



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **RPAS-laitteiden käyttömahdollisuudet vesistörakenteiden tarkkailussa ja muissa vesivaratehtävissä**

Katriina Keto

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Maaliskuu 2020

# TIIVISTELMÄ

RPAS-laitteiden käyttömahdollisuudet vesistörakenteiden tarkkailussa ja muissa vesivaratehtävissä

Katriina Keto

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 103 s. + 1 liite

Työn ohjaaja yliopistolla: Hannu Marttila

Kauko-ohjattavien ilma-alusjärjestelmien (RPAS, Remotely Piloted Aircraft System) eli droonien käyttö ympäristön tutkimuksessa ja seurannassa on lisääntynyt huomattavasti 2010-luvulla RPAS-laitteiden sekä sensoriteknologian kehittyessä ja droonien saatavuuden parantuessa. Vesivarojen hallinta edellyttää monia maastossa tehtäviä havaintoja, joiden hankkimisessa voidaan hyödyntää drooneja. Useita maastomittauksia ei vielä voida täysin korvata drooneilla, mutta droonit tuovat kuitenkin uusia näkökulmia ja niiden avulla voidaan täydentää tutkimuksia korkean spatiaalisen resoluution aineistoilla.

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää RPAS-laitteiden käyttömahdollisuudet vesivarojen hoidon ja käytön suunnittelun tehtävissä, joihin kuuluu muun muassa vesistöarakenteiden kuten patorakenteiden tarkkailu sekä hydrologisen seurannan tehtävät kuten vesistöjen vedenkorkeuden ja virtaaman mittaus. Työ on tehty Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle, jolla oli tarve selvittää ja raportoida droonien hyödyntämismahdollisuudet sen vesistöyksikön tehtävissä. Tämä selvitys on toteutettu kriittisenä kirjallisuuskatsauksena, jossa on kartoitettu RPAS-laitteiden ja -tekniikoiden hyödyntämistapauksia vesivarojen hallintaan, käyttöön ja hoitoon liittyvissä tehtävissä ja sovelluksissa. Työssä käsitellään kirjallisuuskatsauksen tuloksena selvinneiden yleisimpien RPAS-yhteensopivien kaukokartoitusmenetelmien toimintaperiaatteita sekä kokemuksia menetelmien soveltuvuudesta vesistörakenteiden tarkkailuun ja vesivarojen seurantaan ja tutkimukseen. Työssä suoritettua kartoitettavan ja kriittisen kirjallisuuskatsauksen tuloksia ja käsiteltyjä RPAS-sovelluksia voidaan käyttää droonien käytön perusteluna vesivaratehtävissä sekä aloitteena RPAS-laitteiden soveltuvuutta vesivaratehtävissä käsitteleville lisätutkimuksille.

Yleisimpiä droonien hyödyntämiä kaukokartoitusmenetelmiä ovat ilmavalokuvaus, monikaistakuvaus (multi- ja hyperspektrikuvaus), laserkeilaus (LiDAR) sekä lämpökuvaus. Drooneihin asennetuilla kameroilla otettuja ilmavalokuvia käytetään muun muassa tulvatilanteiden seurannassa sekä vesistöjen kunnostustarpeen arvioinnissa. Fotogrammetriset menetelmät eli valokuvien hyödyntäminen maastokohteiden mittauksessa ja 3D-mallinnuksessa soveltuvat esimerkiksi jokirantojen tai patorakenteiden digitaalisten korkeusmallien tuottamiseen. Muita RPAS-yhteensopivia kaukokartoitusmenetelmiä voidaan käyttää esimerkiksi vesistöjen vedenkorkeuden mittauksessa, vesikasvillisuuden kartoituksessa ja lumipeitteen mittauksessa. Selvityksessä on käsitelty myös vähemmän käytettyjä drooneja hyödyntäviä mittausmenetelmiä, joita käytetään esimerkiksi vesistöjen vedenlaadun mittauksessa. Lisätutkimuksia tarvitaan esimerkiksi erilaisten drooneihin asennettujen tutkalaitteiden hyödyntämisessä vesistön virtaaman tai lumipeitteen ominaisuuksien mittauksessa.

*Asiasanat: droonit, multikopterit, vesivarat, kaukokartoitus, fotogrammetria*

# ABSTRACT

Possible applications of RPAS in the monitoring of hydraulic structures and other water resources management tasks

Katriina Keto

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Master's thesis 2020, 103 pp. + 1 Appendix

Supervisor at the university: Hannu Marttila

In the field of environmental research and monitoring, the use of RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), also known as drones, has considerably increased in the 2010s as RPAS and sensor technology have developed and the availability of drones has improved. Water resources management requires field measurements and drones can be utilized in obtaining these required measurements. Drones cannot yet replace many field measurement methods, but the use of drones gives new aspects in environmental monitoring, and previous research materials can be updated with high resolution data obtained with a RPAS.

The objective of this Master's thesis is to investigate the possible uses of RPAS in water resources management tasks such as supervision of dams and other hydraulic structures and hydrological monitoring such as measuring the water elevation and discharge in different water bodies. This Master's thesis is done for the Centre for Economic Development, Transport and the Environment of South Ostrobothnia, where there was a need to investigate and report the possible uses of drones in the tasks of the water resources department. The investigation part of this Master's thesis is carried out as a critical literature review, in which the state-of-the-art RPAS technologies and methods used in water resources management tasks and applications were critically overviewed. The results of the literature review including the operational principles and praxes of RPAS compatible remote sensing methods and their applicability for monitoring of hydraulic structures as well as monitoring and research of water resources are discussed in this report. The outcome of the investigation discussed in this Master's thesis and the results of the completed literature review can be used to justify the use of RPAS in different water resources management tasks and to provide background for further research in the field of drone applications in water resources management.

The most common RPAS compatible remote sensing methods include aerial photography, multispectral and hyperspectral imaging, light detection and ranging (LiDAR) as well as thermal imaging. Aerial photographs produced with cameras mounted in drones are used to assess floods and the need for environmental remediation of surface waters. Photogrammetry, which means measuring and 3D modelling of different objects by using photographs, is suited for digital elevation modelling of riverbanks and earth dams or levees. Other RPAS compatible remote sensing techniques are used in measuring water elevation of surface water bodies and streams, mapping of aquatic vegetation as well as measuring snow depth. This report discusses also some less used RPAS compatible field measurement methods, which are used for example to measure the quality of surface waters. Further research is required to assess the feasibility of using remote sensing instruments such as radar devices attached to a RPAS to measure discharge of streams and properties of snow cover.

*Keywords: drones, multicopters, water resources, remote sensing, photogrammetry*

# ALKUSANAT

Tässä Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle tehdyssä diplomityössä on esitelty RPAS-laitteiden eli droonien käyttömahdollisuuksia erilaisissa vesivarojen hallintaan, käyttöön ja hoitoon liittyvissä tehtävissä. Työ on toteutettu syksyn 2019 ja talven 2020 aikana ELY-keskuksen Seinäjoen toimipisteellä, jossa sain myös käytännön kokemusta droonien lennättämisestä vähälumisina ja lämpiminä talvikuukausina.

Diplomityön ohjauksesta ja tarkastuksesta kiitän Hannu Marttilaa Oulun yliopiston vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmästä. Kiitokset myös Anssi Rauhalalle, Leo-Juhani Meriölle sekä Lauri Ikkalalle ohjeista ja kommentteista työn aihepiirin rajaukseen ja droonien käyttöön liittyen.

Kiitän Etelä-Pohjanmaan ELY-keskusta mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta diplomityön aiheesta. Suurkiitos aihealueen rajauksen ohjeistuksesta ja työn sisällön kommentoinnista kuuluu Tomi Mäelle. Kiitokset diplomityön mahdollistamisesta kuuluvat myös Liisa Maria Rautiolla, Kim Klemolalle sekä Sari Yli-Mannilalle. Kiitän koko työyhteisöä ja ELY-keskuksen Seinäjoen toimipisteen väkeä mukavasta, myötätuntoisesta ja kannustavasta työilmapiiristä.

Erityiskiitokset kuuluvat vanhemmilleni saamastani tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Seinäjoki, 10.03.2020



Katriina Keto

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1 Johdanto .....	10
2 RPAS-toiminta .....	12
2.1 Termistö .....	12
2.2 Lentotoiminta ja sen hallinta .....	14
2.2.1 Lainsäädäntö .....	14
2.2.2 Uudet drone-asetukset EU:ssa .....	15
2.2.3 Riskienhallinta .....	17
2.3 RPAS-laitteet .....	21
2.3.1 Multikopterit .....	22
2.3.2 Paikannusjärjestelmistä .....	24
2.3.3 RPAS-laitteiden autonomia .....	26
3 Mittalaitteet ja menetelmät .....	28
3.1 Kaukokartoituksesta .....	28
3.2 Datan hankinta .....	31
3.3 Datan käsittely .....	33
3.3.1 Datan georeferointi .....	34
3.3.2 Datan geometrinen ja radiometrinen korjaus .....	35
3.4 Ilmavalokuvaus .....	37
3.4.1 Digitaalikamerat ja digitaalisten valokuvien käsittely .....	38
3.4.2 Fotogrammetriset menetelmät .....	41
3.5 Multi- ja hyperspektrikuvaus .....	44
3.6 Lämpökuvaus .....	47
3.7 LiDAR eli laserkeilaus .....	47
3.8 Muut menetelmät .....	49
3.8.1 Kaikuluotaus .....	49
3.8.2 Tutkat .....	50
3.8.3 Vesinäytteenotto ja vedenlaatuanturit .....	51
4 RPAS-laitteiden hyödyntäminen vesivaratehtävissä .....	53
4.1 Vesistörakenteiden tarkkailu .....	54

4.2 Hydrologisen seurannan tehtävät .....	58
4.2.1 Vedenkorkeuden mittaus .....	58
4.2.2 Virtaaman mittaus .....	62
4.2.3 Lumipeitteen mittaus .....	64
4.2.4 Veden lämpötilan mittaus .....	68
4.3 Muut tehtävät .....	70
4.3.1 Tulvien seuranta ja tulvariskien hallinta .....	71
4.3.2 Kunnostuskohteiden seuranta .....	74
4.3.3 Eroosiokartoitus .....	75
4.3.4 Vedenlaadun seuranta .....	77
4.3.5 Kasvillisuuden kartoitus .....	80
4.3.6 Maankuivatus ja ojitus .....	85
4.4 RPAS-laitteiden käyttömahdollisuuksia kartoittavan kirjallisuuskatsauksen johtopäätökset .....	87
5 Yhteenveto .....	92
Lähdeluettelo .....	95

#### Liitteet:

Liite 1. RPAS-laitteiden käyttöä vesivaratehtävissä käsittelevät julkaisut



## MERKINNÄT JA LYHENTEET

$\lambda$	aallonpituus (nm)
v	virtausnopeus (m/s)
Q	virtaama (m <sup>3</sup> /s)
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler, akustinen virtaamaprofiilin mittari
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight, suoran näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva toiminta
DIM	Dense Image Matching, limittäisten kuvien yhdistämiseen käytetty algoritmi
FOV	Field of View, näkökenttä
GCP	Ground Control Point, signaloitu maastotukipiste
GIS	Geographic Information System, paikkatietojärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System, maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
GPS	Global Positioning System, yleisin satelliittipaikannusjärjestelmä
GSD	Ground Sampling Distance, spatiaalinen resoluutio
IMU	Inertial Measurement Unit, inertiamittausyksikkö
LiDAR	Light Detection and Ranging, laserkeilaus
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index, normalisoitu kasvillisuusindeksi
NIR	Near Infrared, sähkömagneettisen spektrin lähi-infrapuna-alue
PIV	Particle Image Velocimetry, virtausnopeuden optinen mittaustekniikka
PPK	Post Processing Kinematic, jälkilaskennallinen kinemaattinen mittaus
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System, kauko-ohjattu ilma-alusjärjestelmä
RTK	Real-Time Kinematic, reaaliaikainen kinemaattinen mittaus
SAR	Synthetic Aperture Radar, synteettisen apertuurin tutka
SfM	Structure from Motion, fotogrammetrinen menetelmä
SORA	Specific Operations Risk Assessment, riskinarviointimenetelmä
UAS	Unmanned Aerial System, miehittämätön ilma-alusjärjestelmä
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus
VLOS	Visual Line of Sight, suora näköyhteys
VRS	Virtual Reference Station, virtuaalinen tukiasema

# 1 JOHDANTO

Kauko-ohjattavien ilma-alusjärjestelmien eli RPAS-laitteiden (Remotely Piloted Aircraft System) suosio sekä harrastustoiminnassa että ammattimaisessa käytössä on kasvanut nopeasti 2010-luvulla tekniikan kehityksen ja kustannusten laskun ansiosta. RPAS-laitteet eli tutummalta nimitykseltään droonit soveltuvat useiden eri toimialojen käyttötarpeisiin. Kiintosiipisiä ja kopterimallisia drooneja hyödynnetään esimerkiksi useissa ympäristön havainnoinnin ja kartoituksen tehtävissä, joissa ne voivat helpottaa työläiden maastomittausten toteuttamista tai vaikeakulkuisen maaston kartoitusta. Käyttönotoltaan joustavilla drooneilla tuotetulla datalla voidaan myös täydentää temporaalisesti puutteellisia tai kustannuksiltaan suuria satelliittihavaintoja. Droonien helppokäyttöisyys ja alhaiset kustannukset sekä kauko-ohjauksen luoma työturvallisuus ovat lisänneet niiden suosiota ympäristön kartoituksessa koulutetun pilotin tarvitsevien miehitettyjen ilma-alusten sijasta. Sensoriteknologian kehityksen ansiosta nykyisten RPAS-laitteiden havainnointikyky on verrattavissa miehitettyihin ilma-aluksiin ja satelliitteihin. RPAS-laitteiden matala lento- korkeus rajoittaa niiden kartoittamien alueiden laajuutta mutta mahdollistaa erittäin korkean spatiaalisen resoluution aineiston tuottamisen.

Vesivarojen hallinta ja niiden käytön suunnittelu edellyttävät useita erilaisia maastossa suoritettavia mittauksia ja havaintoja kuten vesistöjen vedenkorkeuden ja virtaaman mittausta, vesistöarakenteiden tarkkailua ja kunnossapitoa, lumen syvyyden mittausta sulamisvesien aiheuttamien kevättulvien arviointia varten sekä esimerkiksi veden laadun ja lämpötilan seuranta. Automatisoidut mittausasemat ovat sidottuja tiettyyn vesistöön ja manuaalisesti tehtävät mittaukset voivat olla pinta-alaltaan suurilla alueilla aikaa vieviä. Droonit soveltuvat vaikeasti saavutettavien kohteiden kartoitukseen ja tutkimukseen ja niillä on mahdollista kartoittaa laajoja alueita perinteisiä maastomittauksia tehokkaammin. Kaikkiin mittaus- ja kartoitustehtäviin RPAS-laitteet eivät kuitenkaan sovellu niiden toiminnan rajoitusten takia.

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää RPAS-laitteiden käyttömahdollisuuksia erilaisissa vesivarattehtävissä, kuten vesistöarakenteiden tarkkailussa ja hydrologisessa seurannassa. Diplomityö on tehty Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle, jonka vesistöyksikössä oli tarve selvitykselle droonien käyttömahdollisuuksista vesivarojen käyttöön ja hoitoon liittyvissä työtehtävissä. Työssä on keskitytty RPAS-

menetelmiin, joita voidaan hyödyntää sisävesien ja rannikkoalueiden tutkimuksessa. Selvitys on toteutettu RPAS-laitteiden nykyaikaisia käyttösovelluksia kartoittavana ja käyttömahdollisuuksia kritisoivana kirjallisuuskatsauksena. Työssä on myös esitelty droonien toimintaperiaatteita multikoptereihin keskittyen sekä käsitelty RPAS-toiminnassa huomioitavaa lainsäädäntöä, johon on tulossa muutoksia kesällä 2020.

RPAS-laitteiden käyttöä vesistöjen tutkimuksessa on käsitelty useissa englanninkielisissä tieteellisissä julkaisuissa, mutta suomenkielisiä RPAS-laitteiden käyttömahdollisuuksia vesistöjen tutkimuksessa esitteleviä julkaisuja on vielä rajallisesti. Rhee et al. ovat julkaisussaan (2017) luoneet yleiskatsauksen RPAS-laitteiden käyttömahdollisuuksista jokiympäristöjen kaukokartoituksessa. Drooneja on hyödynnetty muun muassa rantavyöhykkeiden kasvillisuuden kartoituksessa, vesistöjen leväkukintojen seurannassa, jokirantojen maastomuotojen kartoituksessa sekä veden virtausnopeuden optisessa mittauksessa. RPAS-laitteita hyödyntävät menetelmät ovat vielä varsin uusia ja menetelmiä kehitetään edelleen sensoriteknologian kehityksen edetessä. Erilaisia etämittaussensoreita kehitetään pienemmiksi ja keveämmiksi, jolloin niitä voidaan käyttää myös pienikokoisiin drooneihin asennettuina.

RPAS-laitteisiin asennetuilla kaukokartoitussensoreilla on mahdollista kartoittaa laajoja alueita nopeasti. Yhdellä lennolla voidaan nykyaikaisilla multikoptereillakin kartoittaa lähemmäs sadan hehtaarin alueita. Kartoitettavan alueen koko riippuu kauko-ohjattavan ilma-aluksen ohjaimen signaalin kantavuudesta ja laitteen lentoaikaa rajoittavasta hyötykuorman painosta. Kaukokartoitusaineistoa kertyy yleensä suuria määriä lentojen aikana. Vaikka kohteen kuvaus onnistuu nopeasti, hankitun datan prosessointi ja analysointi vaativat paljon resursseja, jotta olennainen tieto saadaan poimittua. RPAS-laitteita hyödyntävissä tutkimuksissa käytetyt kaukokartoitusaineiston analysoinnin menetelmät vaativat perehtymistä sähkömagneettisen säteilyn heijastumiseen vaikuttaviin tekijöihin sekä RPAS-tekniikan virhelähteisiin. Useiden datankäsittelyohjelmistojen toimintoja on automatisoitu ja ohjelmistoista on tehty helppokäyttöisiä, mutta saatujen tulosten validointi vaatii tulosten analysointia sekä vertailukohteita. Koska RPAS-teknologia on varsin uutta ja innovatiivista, tulosten vertailu olemassa olevien tutkimustulosten kanssa voi olla haastavaa. Useat RPAS-laitteita hyödyntävät menetelmät vaativatkin vielä lisätutkimuksia luotettavan datan tuottamiseksi.

## 2 RPAS-TOIMINTA

RPAS-laitteita (Remotely Piloted Aircraft System) eli kauko-ohjattavia ilma-alusjärjestelmiä käytetään moniin useisiin tarkoituksiin tutkimuksen, teollisuuden ja liike-elämän eri osa-alueilla. Käyttökohteita löytyy muun muassa maaston kartoituksessa, ympäristön muutosten seurannassa, rakenteiden kunnan tarkkailussa, maataloudessa, pelastustyössä, kuvitusmateriaalin tuottamisessa median tarpeita varten sekä myös harrastustoiminnassa kuten lentokilpailuissa.

Miehittämättömien ilma-alusten (UAV) kehitystä on alun perin ohjannut militaristinen toiminta ja sen tarpeet sotilastiedustelussa. Miehittämättömillä ilma-aluksilla pystytään turvallisesti suorittamaan tehtäviä, jotka voisivat aiheuttaa ihmisille vaaraa ilma-aluksen ollessa miehitetty. Tämä ominaisuus herätti kiinnostuksen drooneja kohtaan myös tieteellisen tutkimuksen piireissä jo kylmän sodan aikana, mutta tuolloin tehokkaat ja tarkkaa aineistoa tuottavat sensorit olivat kooltaan suuria ja hinnaltaan kalliita. Jotta miehittämättömien ilma-alusten käyttö tieteellisessä tutkimuksessa olisi ollut järkevää ja kustannus-tehokasta, tuli sensorien olla tarpeeksi pieniä ja edullisia. Sensoreiden alkava miniaturisaatio innosti yksityisiä tahoja kehittämään ”DIY-drooneja” (do it yourself) 1990-luvun lopulla. Suosio laajeni edelleen, kun droonien potentiaali tieteellisessä tutkimuksessa huomioitiin useilla eri tutkimusaloilla. Drooneissa yhdistyi pienien järjestelmien edullisuus, käytön joustavuus ja helppo liikutettavuus sekä hankitun aineiston tarkkuus ja laatu, johon ennen oli päästy vain kooltaan suurilla sensoreilla. (Colomina & Molina 2014; Watts et al. 2012)

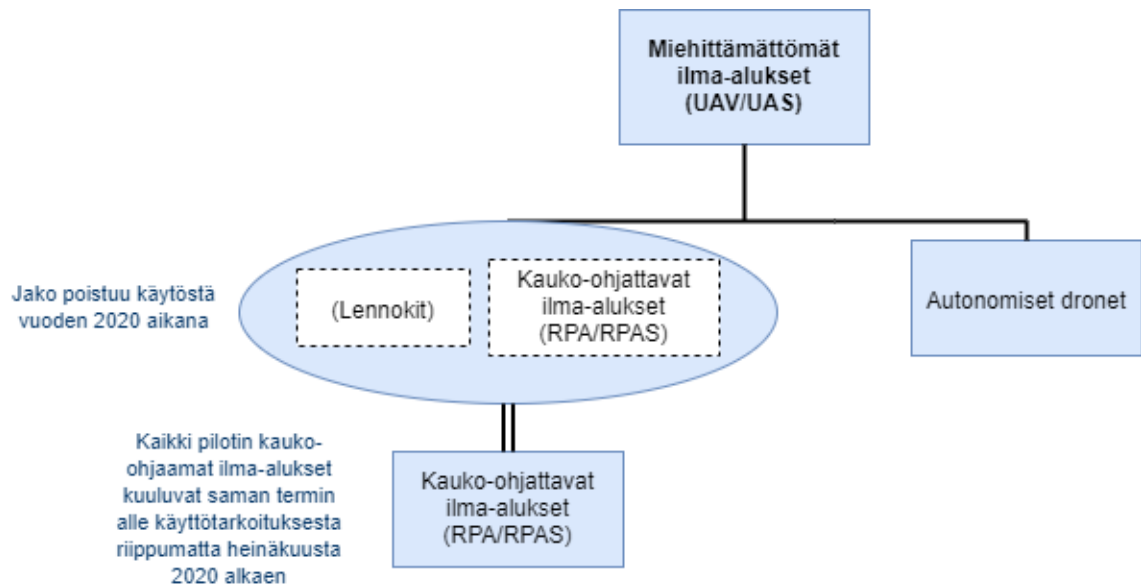
Nykyään tieteelliseen tutkimukseenkin sopivia, tarkkoja valokuvia tuottavia kauko-ohjattavia kuvauskoptereita on saatavilla suoraan kaupan hyllyltä. Dronien nopea kehitys, hintojen lasku ja siitä seurannut suosion kasvu on tuonut tarpeen uudistaa RPAS-toiminnan lainsäädäntöä, johon myös Suomessa on tulossa muutoksia kesällä 2020 uusien EU-asetusten tullessa voimaan.

### 2.1 Termistö

Droonit eli RPA-laitteet (Remotely Piloted Aircraft) ovat kauko-ohjattuja ilma-aluksia. Englannin kielessä sanalla drone voidaan tarkoittaa kuitenkin kaikkia miehittämättömiä aluksia, jotka kulkevat maalla, vedessä tai ilmassa (Traficom 2018). Suomen kielessä

sana drooni (tai drone) on vakiintunut tarkoittamaan kauko-ohjattavaa lentolaitetta. Muita drooniin verrattavia kirjallisuudessa käytettyjä termejä ovat muun muassa ROA (Remotely Operated Aircraft) ja RPV (Remotely Piloted Vehicle).

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom määrittelee Droneinfo.fi-sivustollaan (Traficom 2018) kauko-ohjatut ilma-alukset (RPA) miehittämättömien ilma-alusten alakategoriaksi. Miehittämättömistä ilma-aluksista käytetään muun muassa termejä UA (Unmanned Aircraft), UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sekä AUV (Aerial Unmanned Vehicle). Miehittämättömät ilma-alukset eroavat kauko-ohjatuista ilma-aluksista siinä, että ne voivat olla myös autonomisesti lentäviä, kun taas kauko-ohjattua ilma-alusta pilotti ohjaa etäyhteydellä. Nykyisissä säädöksissä droonit jaetaan kauko-ohjattaviin ilma-aluksiin ja lennokkeihin niiden käyttötarkoituksen mukaan. Traficom määrittelee määräyksessä OPS M1-32 lennokkien olevan harrastus- tai urheilutarkoituksessa käytettäviä kauko-ohjattuja tai autonomisesti lentäviä laitteita. Tämä jako (kuva 1) käyttötarkoituksen mukaan tulee kuitenkin poistumaan käytöstä vuoden 2020 aikana, kun uudet drooneja koskevat EU-asetukset tulevat voimaan. Tässä diplomityössä keskitytään kauko-ohjattaviin ilma-aluksiin, ja termiä drooni käytetään samassa merkityksessä. Lainsäädäntöön viitattaessa käytetään käsiteltävässä asetuksessa, säädöksessä tai laissa käytettyä termiä, joka useissa tapauksissa on miehittämätön ilma-alus.



Kuva 1 Drooneista käytettyjä termejä

Kauko-ohjattavan ilma-aluksen kokonaisjärjestelmästä käytetään termiä RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) ja vastaavasti miehittämättömästä ilma-alusjärjestelmästä termiä UAS (Unmanned Aerial System). Kokonaisjärjestelmään kuuluu alustan (kopterin tai kiintosiipisen droonin) lisäksi sen lennättämisessä tarvittavat lisälaitteet ja ohjelmistot. Lisälaitteista käytetään usein termiä hyötykuorma. Hyötykuorma tarkoittaa sellaista mekaniismia tai laitetta, joka on asennettu tai kiinnitetty ilma-alukseen ja jota ei käytetä ilma-aluksen toimintaan tai ohjaukseen lennon aikana (Euroopan komission täytäntöönpanoasetuksen (EU) 2019/947 2 artikla). Kokonaisjärjestelmään luetaan kuuluvaksi myös kauko-ohjauspaikat ja tarvittavat ohjaus- ja seurantalaitteet ja -yhteydet (Traficom 2018).

## **2.2 Lentotoiminta ja sen hallinta**

RPAS-toimintaan kuuluu harrastustoimintaa ja lentotyötoimintaakin. Lentotyöllä tarkoitetaan kaikkea muuta toimintaa kuin harraste- ja urheilutoimintaa (Traficom 2019b). Lentotyötä harjoittavien RPAS-laitteiden käyttäjien on tehtävä toimijailmoitus. Harraste- ja ammattitoiminnan välinen jako kuitenkin poistuu vuonna 2020 voimaan tulevien, koko EU:n kattavien, drone-asetusten myötä. Kaikkien toimijoiden on rekisteröidyttävä heinäkuusta 2020 lähtien sekä suoritettava verkkokurssi ja -tentti (Tiirikainen 2019). Tammi-kuussa 2020 Traficomin ylläpitämässä rekisterissä oli rekisteröityneenä noin 3000 lentotyötoimijaa (Traficom 2020).

Kaikessa ilmailussa turvallisuus on keskeisessä roolissa. Myös RPAS-toiminnassa on huomioitava toiminnasta aiheutuvat riskit ihmisille ja ympäristölle ja hallittava näitä riskejä parhaalla mahdollisella tavalla lainsäädännön määräysten mukaisesti.

### **2.2.1 Lainsäädäntö**

Globaalisti RPAS-toiminnassa sovelletaan laajalti ilmailualan ja lentotoiminnan yleistä lainsäädäntöä, ja valtiokohtaisesti toimintaa säädellään erilaisilla kauko-ohjattavien ja miehittämättömien ilma-alusten käytön määräyksillä. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on Suomen ilmailuviranomainen, joka huolehtii ilmailun yleisestä turvallisuudesta. Nykyisin Suomessa RPAS-laitteiden käyttöä säätelee Traficomin määräys "OPS M1-32 Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin käyttäminen ilmailuun", joka on tullut voimaan 7.12.2018. Määräyksen perustana on ilmailulaki 864/2014 (5, 9, 57 §), sekä laki liikenteen palveluista 320/2017 II osa 12 luku 8 §.

Määräyksessä OPS MI-32 on säädetty kauko-ohjatun ilma-aluksen käyttämisen yleisistä vaatimuksista. Kauko-ohjattavan ilma-aluksen käytöstä aiheutuva vaara ulkopuolisille ihmisille ja heidän omaisuudelleen sekä toiminnasta aiheutuva melu on oltava mahdollisimman pienet. Kauko-ohjatuista lennoista tulee pitää lentopäiväkirjaa, johon on tallennettava tiedot muun muassa lennon päivämäärästä, lähtö- ja laskupaikasta, ilma-aluksen valmistajasta ja mallista sekä lentotehtävän luonteesta. Kauko-ohjatun ilma-aluksen suurin lentoonlähtömassa saa olla enintään 25 kg ja käytön on oltava suoraan näköyhteyteen (VLOS) tai tähystäjien käyttöön perustuvaa. Lentokorkeuden on oltava alle 150 metriä maan tai veden pinnasta, mutta korkeusrajoitus ei kosken kiinteän esteen läheisyydessä tapahtuvaa lentämistä kohteen omistajan luvalla (OPS M1-32 3.1.11 d). Jos toiminta ei täytä näitä vaatimuksia, on liikenteen turvallisuusvirastolta haettava toiminnalle poikkeuslupaa. Hakemuksessa on esitettävä kirjallinen toimintakuvaus ja turvallisuusarviointi.

Määräyksen OPS M1-32 lisäksi Suomessa harjoitettavassa RPAS-toiminnassa on huomioitava sääntely liikennealan normeissa, joihin kuuluvat:

- EU:n lentosäännöt, asetus (EU) 923/2012
- Ilmailun vakuutusasetus (EY) N:o 785/2004
- Ilmailulaki (864/2014)
- Valtioneuvoston asetus (930/2014) ilmailulta rajoitetuista alueista

Ilmailulaista (864/2014) RPAS-toiminnassa huomioidaan muun muassa pykälä 159, jonka mukaan lentoliikenteelle vaaraa aiheuttava toiminta tai lentoliikenteen sujuvuutta häiritsevä toiminta on kielletty. RPAS-toiminnassa on toiminnan turvallisuuden lisäksi huomioitava myös yksityisyyden suoja ja kotirauhan kunnioittaminen. Tietosuojalainsäädäntöä sovelletaan, jos kauko-ohjattu ilma-alus on varustettu henkilötietojen keräämiseen soveltuvalla kameralla, videonauhurilla tai muulla sensorilla. Esimerkiksi kaikki droonien ottamat kuvat, joista voidaan tunnistaa henkilö, kuuluvat tietosuojalainsäädännön piiriin (DroneRules.eu 2018).

### **2.2.2 Uudet drone-asetukset EU:ssa**

Euroopan unioni on kesäkuussa 2019 julkistanut koko Euroopan unionin kattavat drone-asetukset, joita ryhdytään pääsääntöisesti soveltamaan 1.7.2020 alkaen (Traficom 2019a).

Siirtymäajat päättyvät kesällä 2022. Uusien asetusten tavoitteena on varmistaa miehittämättömän ilmailutoiminnan turvallisuus Euroopassa. Säännösten on tarkoitus suojella EU:n kansalaisten turvallisuutta ja yksityisyyttä samalla mahdollistaen droonien käytön sääntelyn yhtenäistämisen Euroopan unionin alueella (EASA 2019).

Uusi lainsäädäntö perustuu kehitystyöhön, jota on tehty kansainvälisessä JARUS-organisaatiossa (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems). Kansalliset, asetuksia täydentävät määrittelyt sekä käyttäjärekisterit ovat valmisteilla ja ne julkistetaan vuonna 2020 ennen uusien asetusten voimaantuloa. Uudet drone-asetukset ovat Suomessa suoraan sovellettavaa lainsäädäntöä. Käytännön lentotoiminnassa huomattavin muutos on suurimman sallitun lentokorkeuden pieneneminen nykyisestä 150 metristä 120 metriin. Lentokorkeus on etäisyys maan tai veden pinnasta, ja 120 metriä korkeampia esteitä on sallittua väistää nousemalla hetkellisesti 15 m niiden yläpuolelle. Toinen huomattavin muutos on se, että kaikkien UAS-laitteiden käyttäjien on rekisteröidyttävä sekä suoritettava kurssseja ja tenttejä, joiden laajuus riippuu harjoitettavasta UAS-toiminnasta.

UAS-toiminta tullaan jakamaan kolmeen eri toimintakategoriaan Euroopan komission täytäntöönpanoasetuksen (EU) 2019/947 3 artiklan mukaisesti. Kategorisointi on tehty sen mukaan, kuinka vaativasta operoinnista on kyse ja kuinka suuren riskin toiminta aiheuttaa. Toimintakategoria määrittää UAS-toiminnan riskinhallinnassa sovellettavat toimenpiteet. Kategoriat ovat "avoin", "erityinen" ja "sertifioitu", ja ne määritellään asetuksessa seuraavasti:

- Kategoriassa "avoin" (open) harjoitettavaan toimintaan ei vaadita ennakoon haettavaa toimintalupaa, eikä UAS-toiminnasta tehtävää ilmoitusta ennen toiminnan aloittamista.
- Kategoriassa "erityinen" (specific) harjoitettavaan toimintaan vaaditaan toimivaltaisen viranomaisen antama toimintalupa tai standardiskenaarioissa määritellyissä olosuhteissa miehittämättömän ilma-alusjärjestelmän käyttäjän tekemä ilmoitus.
- Kategoriassa "sertifioitu" (certified) harjoitettavaan toimintaan vaaditaan delegoidun asetuksen (EU) 2019/945 mukainen sertifiointi sekä käyttäjän hyväksyntätodistus ja tarvittaessa kauko-ohjaajan kelpoisuustodistus.

Suurin osa RPAS-toiminnasta tulee kuulumaan kategoriassa "avoin" harjoitettavaan toimintaan. Avoimen kategorian yleisiin sääntöihin kuuluu, että droonin suurin sallittu len-



toonlähtömassa (MTOM, Maximum Take-Off Mass) on 25 kg ja suurin sallittu lentokorkeus on 120 metriä maan tai vesistön pinnasta. Avoimessa kategoriassa drooni tulee aina olla näköyhteydessä (VLOS, Visual Line of Sight), eikä lentäminen ilman näköyhteyttä (BVLOS, Beyond Visual Line of Sight) ole sallittua. Avoimessa kategoriassa myös autonomiset lennot, vaarallisten aineiden kuljettaminen sekä esineiden pudottaminen on kiellettyä. Avoin kategoria on edelleen jaettu alakategorioihin A1, A2 ja A3 riippuen muun muassa käytetyn droonin koosta.

Avoimessa kategoriassa drooneilta vaaditaan etätunnistusjärjestelmä. Etätunnistusjärjestelmää voidaan verrata ajoneuvojen rekisterinumeroihin, joiden avulla jokainen ajoneuvo voidaan tunnistaa, ja viranomainen voi selvittää ajoneuvon omistajan. Käytännössä etätunniste koostuu tarrasta tai muusta merkinnästä droonin rungossa sekä droonissa olevasta laitteesta, joka lähettää wifi- tai bluetoothsignaalia. Uusien asetusten mukaan vanhoja laitteita, joissa ei ole etätunnistusjärjestelmää, eikä sellaista voida laitteeseen lisätä, ei voida käyttää avoimen kategorian toiminnassa.

Jos toiminta ylittää avoimelle kategorialle asetetut kriteerit, kuuluu toiminta kategoriaan ”erityinen”. Tällöin vaaditaan erillinen UAS-toiminnan ilmoittamis- tai hyväksyntämenettely ennen toiminnan aloittamista. Ilmoitus toiminnasta voidaan tehdä käyttämällä standardiskenaarioita, jotka JARUS on määritellyt ilmoitus- ja lupamenettelyn yksinkertaistamiseksi. Tämän selvityksen kirjoitushetkellä näitä standardiskenaarioita ei ole vielä määritetty. Jos toimintaa ei voida kuvata valmiiksi määritetyillä skenaarioilla, on toiminnanharjoittajan tehtävä systemaattinen riskienarviointi ja haettava toiminnalle lupa toimivaltaiselta viranomaiselta.

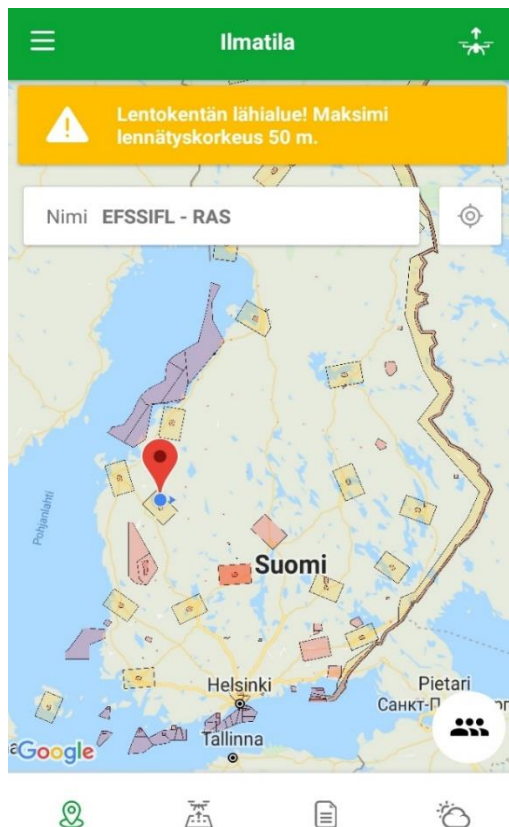
### **2.2.3 Riskienhallinta**

Kuten kaikessa lentotoiminnassa, myös RPAS-toiminnassa turvallisuus on tärkeää. Lentotyön turvallisuudesta pidetään huolta riskienhallinnan keinoin sekä noudattamalla RPAS-toimintaa sääteleviä määräyksiä. Riskienhallinta koostuu riskien tunnistamisesta ja arvioinnista sekä riskien pienentämisen ja ennaltaehkäisyn toimenpiteistä. Dronien käyttäjät voivat järjestäytyä yritys- ja harrastustoiminnassa ja ottaa käyttöönsä esimerkiksi lentotoimintaa ohjaavan toimintakäsikirjan.

Kauko-ohjaaja on vastuussa RPAS-toiminnan turvallisuudesta. Ennen droonin lennättämistä droonin ja sen lisälaitteiden kunto sekä toimivuus tulee tarkistaa. RPAS-laitteet voivat myös autonomisesti tarkistaa sensoreidensa ja paikannusjärjestelmiensä toimivuuden ennen lentoonlähdön olevan mahdollista. Lennot ja niiden tarkoitus on syytä suunnitella etukäteen ja ennen lentoa tarkistaa alueelliset rajoitukset.

RPAS-toiminnan riskit liittyvät muun ilmailun ja lentoliikenteen vaarantamiseen, RPAS-laitteen epätoimivuuteen sekä yksityisyydensuojan rikkomiseen. Dronin törmäys lentokoneeseen tai helikopteriin voi aiheuttaa vakavan lento-onnettomuuden. Vaara on oleellinen lentokoneiden noustessa ilmaan ja laskeutuessa maahan, ja droonien lennättämistä onkin rajoitettu lentokenttien lähialueilla. Aivan lentokentän läheisyydessä droonien lennättäminen on kielletty. Onnettomuuksien riski kasvaa RPAS-laitteiden yleistessä. RPAS-laitteita on nykyään helposti saatavilla suoraan kaupan hyllyltä, joten onnistunut tiedottaminen RPAS-toiminnan lakisääteisistä velvollisuuksista sekä hyvistä käytännöistä on riskienhallinnan kannalta tärkeää.

Suomessa droonien lennättämisen rajoitus- ja kieltoalueet voi tarkistaa Traficomin Droneinfo.fi-sivustolta tai Droneinfo-sovelluksesta (kuva 2). Rajoitus- ja kieltoalueilla lennättämiseen voidaan hakea erityislupaa alueen lennonjohdolta. Suomen ilmatilan väliaikaiset rajoitusalueet julkaistaan droneinfo.fi-sivustolla. Dronien lennättämistä on rajoitettu sovelluksen karttaan merkityillä asutuskeskusten tiheästi asuttujen alueiden yläpuolella määräyksessä OPS M1-32. Tiheästi asutuilla alueilla lentotoiminnasta aiheutuva riski on ulkopuolisille ihmisille ja heidän omaisuudelleen suurempi kuin harvaan asutuilla alueilla. Kaupunkialueilla riskinä on myös droonin ohjautuvuuden huononeminen sen paikannusjärjestelmien käyttämien signaalien häiriintyessä esteiden kuten korkeiden rakennusten takia. Myös puut voivat häiritä ohjaimen ja droonin välistä linkkiä. Lentoympäristön voimakkaasti häiritsevät radiosignaalit voivat aiheuttaa droonin sensoreiden ja paikannusjärjestelmän toimintavirheen, jolloin ohjausyhteys voidaan menettää. Määräyksen OPS M1-32 mukaisesti kauko-ohjaajalla on oltava ennalta määritelty menettely siltä varalta, että ilma-aluksen ohjaaminen estyy. Drooniin on syytä kiinnittää erillinen GPS-paikannin, jos vaarana voi olla näköyhteyden menettäminen ja droonin kadottaminen.



Kuva 2 Lennätysrajoitus- ja kieltoalueet Droneinfo-sovelluksessa, kuvankaappaus

RPAS-laitteet voivat automaattisesti paikannusjärjestelmiään käyttäen havaita lennättämisen rajoitus- ja kieltoalueet ja pysähtyä alueen reunalle tai kiertää alueen. Tekniikka kutsutaan geoaiteknikaksi (geofencing tai geo-awareness), ja sitä voidaan hyödyntää myös väliaikaisten lentokieltoalueiden rajauksessa. Geoaiteknikka varoittaa kauko-ohjaajaa automaattisesti, jos drooni lähestyy lentokielto- tai rajoitusaluetta, mikä pienentää RPAS-toiminnasta aiheutuvaa vaaraa etenkin, jos droonia lennätetään uudessa lokaatiossa.

Droonit voivat törmätä ympäristön esteeseen ja törmäys voi aiheuttaa laitteen putoamisen maahan, mistä aiheutuu myös vaaraa maassa oleville ihmisille ja heidän omaisuudelleen. Drooneja ei koskaan tulisi lennättää ihmisjoukkojen yläpuolella. Useissa drooneissa hyödynnetään esteentunnistustekniikoita, joiden toiminta perustuu esimerkiksi lyhyen kantaman ultraääni- tai infrapunasensorien tekemiin jatkuviin etäisyysmittauksiin ja luotauksiin. Drooni voi väistää esteen automaattisesti. Vastuu törmäysten estämisestä on kuitenkin kauko-ohjaajalla, ja kauko-ohjaajan tai tähystäjän on pidettävä drooniin näköyhteys

ja havainnoitava sen ympäristöä törmäysriskien varalta. Sääolosuhteet kuten kirkas auringonpaiste tai sumu voivat häiritä näköyhteyden ylläpitämistä. Sääolosuhteista voi aiheutua myös haittaa droonin ja sen hyötykuorman toiminnalle. Vesisade voi vaurioittaa droonin tai sen hyötykuorman rakennetta, ellei se ole suljettu ja vedenpitävä. Ilman lämpötilan ollessa pakkasen puolella kopterimallisten droonien propelleihin voi muodostua jäätä, mikä voi häiritä niiden toimintaa. Tuulen suunta ja nopeus on tärkeä huomioida droonia lennättäessä. Droonien valmistajat ovat usein määritelleet suosituksen suurimmasta tuulennopeudesta, jonka vallitessa droonia voi lennättää. Vastatuuleen lentäminen lisää droonin tehonkulutusta, mistä voi aiheutua akkujen tavallista nopeampi tyhjeneminen.

Vuonna 2020 voimaan tulevissa EU-asetuksissa on määritetty kategorian ”erityinen” standardiskenaariot, joiden avulla lupa UAS-toiminnalle voidaan hakea ilmoitusmenettelyllä. Jos harjoitettava UAS-toiminta ei ole näissä standardeissa kuvattua toimintaa, on toiminnalle tehtävä erillinen riskinarviointi. Riskinarviointia varten JARUS on kehittänyt SORA-menetelmän (Specific Operations Risk Assessment), joka perustuu syitä ja seurauksia analysoivaan ”bowtie”-riskienhallintamalliin. SORA on tarkoitettu UAS-toiminnan riskinarviointiin pääasiassa toimintakategoriassa ”erityinen”. SORA:a ei vielä tätä selvitystä kirjoitettaessa ole käännetty suomeksi. SORA koostuu systemaattisesta kokonaisvaltaisesta riskien määrittämisestä ja riskien pienentämisen toimenpiteiden määrittämisestä. Siinä on huomioitu strategiset toimet liittyen lennonsuunniteluun sekä taktiset toimet lennon aikana. SORA:n systemaattiset askeleet ovat (Traficom 2020):

- CONOPS (Concept of Operations) eli kuvaus käytetyn laitteen teknisistä tiedoista sekä operoinnin ja kokonaisjärjestelmän tiedoista, joita riskinarvioinnissa tarvitaan
- GRC:n (Ground Risk Class) eli laitteen putoamisesta aiheutuvan riskin luokan määrittäminen, toisin sanoen maariskin määrittäminen
- ARC:n (Air Risk Class) eli ilmassa tapahtuvien törmäysten riskien luokan määrittäminen, toisin sanoen ilmariskin määrittäminen
- Strategiset toimet ilmariskin pienentämiseksi
- TMPR (Tactical Mitigation Performance Requirement) eli taktiset toimet ilmariskin vähentämiseksi lennon aikana
- SAIL:in eli toiminnan kokonaisriskin määrittäminen

- OSO:n (Operational Safety Objectives) eli toiminnan turvallisuustavoitteiden määrittäminen ja luotettavuusvaatimukset
- Ympäröivien alueiden huomioiminen
- Yksityiskohtaisen dokumentaation luominen hakemusta varten

Dokumentoitu riskienarviointi toimitetaan toimivaltaiselle viranomaiselle. Se sisältää tiedon toiminnan turvallisuustavoitteista ja keinoista pienentää toiminnan riskejä sekä maassa että ilmassa. Esimerkiksi maariskiä voidaan pienentää vähentämällä lentotoiminnan alueella olevien ihmisten määrää. Ilmariskien hallinnan perusteena on sallittujen lentokorkeuksien noudattaminen. Riskienarvioinnissa on myös huomioitava tilanteet, joissa laitteen vikatilanteesta johtuen laite ajautuu alueelle, jolla ei oltu suunniteltu lentämistä.

## 2.3 RPAS-laitteet

Kauko-ohjattavia ilma-alusjärjestelmiä on kehitetty sekä harrastekäyttöön että ammattimaiseen toimintaan. Droonin koko ja muut ominaisuudet sekä sen hyötykuormaan kuuluvat lisälaitteet vaihtelevat käyttötarkoituksen ja valmistajan mukaan. Esimerkiksi ammattitason kartoituskäyttöön kehitetyissä laitteissa on kiinnitetty erityistä huomiota laitteen vakauteen ja paikannusjärjestelmiin, kun taas lentokilpailuissa käytettävien laitteiden tulee olla mahdollisimman nopeita ja helposti ohjautuvia. Droonien koko vaihtelee muutamia grammoja painavista nanodrooneista tuhansia kiloja painaviin sotilastoiminnassa käytettäviin ilma-aluksiin (Honkavaara et al. 2018).

Droonit voidaan jakaa eri tyyppeihin niiden lentämisen mahdollistavien toimintaperiaatteiden perusteella. Yleisimpiä malleja ovat pyöriväsiipiset (rotary wing) multikopterit sekä kiinteäsiipiset (fixed wing) droonit. Molemmilla malleilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Kiinteäsiipiset droonit ovat muodoltaan siiven mallisia tai ne muistuttavat lentokoneen pienoismallia. Ne lentävät siipiensä muodostaman nosteen ja moottorin tuottaman työntövoiman avulla. Siipien tuottaman nosteen ansiosta ne ovat energiatehokkaita ja pystyvät lentämään pidempiä matkoja kuin multikopterit, jotka lentävät roottorien avulla. Kiinteäsiipisillä drooneilla voidaan kattaa laajoja alueita yhdellä lennolla. Niiden täytyy kuitenkin ylläpitää tietty nopeus pysyäkseen ilmassa, eivätkä ne pysty lentämään hitaasti tai leijumaan paikoillaan kuten kopterimalliset droonit. Kiinteäsiipiset droonit ei-

vät sovellu esimerkiksi vertikaalisten rakenteiden kuten rakennusten seinien kunnon yksityiskohtaiseen visuaaliseen tarkkailuun. Kiinteäsiipisiä drooneja kehittävät muun muassa sveitsiläinen senseFly ja suomalainen Avartek.

Kiinteäsiipiset dronit tarvitsevat yleensä kiitoradan tai katapultin lentoonlähtöä varten sekä paljon tilaa laskeutumista varten (Honkavaara et al. 2018). Viime vuosina on kuitenkin kehitetty myös drooneja, joiden rakenteessa on hyödynnetty sekä kiinteitä siipiä että propelleja (Chapman 2020). Tällaiset VTOL-dronit (Vertical Take-Off and Landing) pystyvät siis nousemaan ja laskeutumaan vertikaalisesti multikopterin tavoin, toisin kuin perinteiset kiinteäsiipiset dronit. Esimerkiksi Amazon Prime on kehittänyt VTOL-drooneja kuljetuspalveluitaan varten (D'onfro 2019). Suosituimpia kauko-ohjattavia lentolaitteita nykyään ovat kuitenkin multikopterit, joiden käyttöön ja ominaisuuksiin myös tässä diplomityössä keskitytään.

### **2.3.1 Multikopterit**

Multikopterit (multirotor, multicopter, rotary wing) ovat pyöriväsiipisiä ilma-aluksia, jotka käyttävät roottoreita ja propelleja lentämiseen. Roottorien ansiosta ne pystyvät lentämään kaikkiin kolmiulotteisen avaruuden suuntiin, leijumaan eli pysymään paikallaan ilmassa sekä lentämään hitaasti, mikä on tarpeen etenkin ahtaissa paikoissa kuten metsässä lentäessä ja lentoympäristön esteitä väistellessä. Kiinteäsiipiset ilma-alukset eivät tähän pysty, ja siksi multikoptereita käytetäänkin kiinteäsiipisten droonien sijasta tarkkuutta ja liikkuvuutta vaativissa kuvaus- ja kartoitustehtävissä. Multikopterien lentoaika on kuitenkin lyhyt kiinteäsiipisiin drooneihin verrattuna niiden suuren tehonkulutuksen takia, mikä rajoittaa niiden lentoaikaa ja käyttöä laajojen alueiden kartoituksessa. Multikopterin tehonlähteenä toimii yleensä akku, joka on laitteen painavin komponentti.

Multikopterit koostuvat rungosta ja roottoreista, joita on yleensä neljästä kahdeksaan parillinen määrä. Roottorit on yleensä sijoitettu symmetrisesti kopterin rungon painopisteeseen nähden. Neljän roottorin kopteria kutsutaan nelikopteriksi (quadcopter), kuuden roottorin kopteria heksakopteriksi (hexacopter) ja kahdeksan roottorin kopteria oktokopteriksi (octocopter). Markkinoilla on myös kahden ja kolmen roottorin drooneja eli bi- ja trikoptereita. Suosituin malli kuluttajamarkkinoilla on nelikopteri, josta esimerkki on esitetty kuvassa 3. Multikoptereita valmistavat muun muassa kiinalainen DJI ja suomalainen VideoDrone Finland Oy.



Kuva 3 Suomalaisvalmisteinen GeoDrone X4L -nelikopteri

Multikoptereita käytetään valokuvien ja videokuvan tuottamiseen niiden vakauden sekä leijumiskyvyn ansiosta. Valokuvaukseen tarkoitetuista multikoptereita käytetään usein myös ilmausta kuvauskopteri. Multikopterit lähtevät lentoon suoraviivaisesti ylös samoin kuin ne laskeutuvat suoraan alaspäin, mikä helpottaa niiden käyttöä. Multikoptereiden kyky lentää kaikkiin kolmiulotteisen avaruuden suuntiin perustuu roottorien ja propellien tuottamaan nosteeseen (lift) sekä vääntömomenttiin (torque). Multikoptereiden liikesuuntaa ja nopeutta kontrolloidaan muuttamalla kaikkien tai yksittäisten roottoreiden kierrosnopeuksia. Jotta kopterin runko ei pyörisi propellien aiheuttaman vääntömomentin takia Newtonin kolmannen liikelain mukaisesti, multikopterin roottorit pyörivät eri suuntiin. Liikkeen suunta riippuu siitä, minkä roottorin tai roottorien yhdistelmien kierrosnopeutta muutetaan. Multikoptereissa roottoreita on yleensä parillinen määrä, joten ne ovat roottorien suhteen joka suunnasta symmetrisiä. Liike eteen ja taakse on siis toimintaperiaatteeltaan samanlaista kuin liike sivuttaissuunnassa. Multikopteria liikutetaan ylös- ja alaspäin muuttamalla kaikkien roottoreiden kierrosnopeutta yhtä aikaa. Roottoreiden kierrosnopeuden lisääminen puskee ilmaa alas, jolloin multikopteri nousee ylöspäin koska nosteen aiheuttama työntövoima on suurempi kuin multikopterin painovoima. Kun työntövoima ja painovoima ovat yhtä suuret, multikopteri leijuu pystysuunnassa paikoillaan. Pienentämällä kaikkien roottorien kierrosnopeutta multikopteri laskeutuu alaspäin. (Audronis 2014, s.6–9)

Multikopterin roottoreiden kierrosnopeuden muuttaminen on automatisoitu ja liikettä ohjataan radio-ohjaimella. Käytännössä ohjaus tapahtuu yleensä kahdella sauvaohjaimella (joystick), joista toisella muutetaan kopterin lentokorkeutta sekä keulan suuntaa ja toisella

kohteria liikutetaan eteen- ja taaksepäin sekä sivuttaissuunnassa. Radio-ohjaimessa voi myös olla näyttö, jossa esitetään droonin telemetriatietoja. Näytöllä voidaan esittää esimerkiksi lentokorkeus, akun jännite sekä tehonkulutus. RPAS-laitteet määrittävät lentokorkeutensa GNSS-paikannuksen sekä muiden korkeusmittarien kuten barometrien avulla. Radio-ohjain voidaan automatisoida ilmoittamaan akun jännitteen tippuessa niin alhaiseksi, että kopterin on syytä laskeutua. (Lim et al. 2012)

### 2.3.2 Paikannusjärjestelmistä

Drooneja voidaan lennättää pelkän radio-ohjaimen avulla, mutta yleensä RPAS-laitteet käyttävät paikannusjärjestelmiään lentämisessä kauko-ohjaajan määrittämään suuntaan. Paikannusjärjestelmät koostuvat satelliittipaikannusjärjestelmistä sekä droonien sisäisistä sensoreista, jotka mittaavat muun muassa lentokorkeutta. RPAS-laitteen tarkan asentotiedon määrittämiseen käytetään droonien INS-järjestelmää (Inertial Navigation System) ja inertiamittaussensoreita (Inertial Measurement Unit), jotka koostuvat gyroskoopeista, kiihtyvyysantureista ja barometreistä. Droonin sijaintitiedon arviointiin käytetään myös laajennettuja Kalman-suotimia. (Audronis 2014, s.63; Bristeau et al. 2011)

Satelliittipaikannus perustuu Maata kiertävien satelliittien ja vastaanottimen välisiin mitattuun etäisyyksiin. Etäisyys saadaan laskettua, koska signaalin tiedetään kulkevan valonnopeudella ja satelliitin lähettämä signaali sisältää tiedon signaalin lähettämisen ajankohdesta sekä satelliitin sijainnista kiertoradalla. Satelliittien tunnetuista sijainneista voidaan laskea havaittajan paikka, joka ilmoitetaan koordinaateilla.

GNSS-vastaanottimet voivat tukea useita satelliittijärjestelmiä yhtä aikaa. NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite And Ranging Global Positioning System) eli tutummin GPS toimii kaikkialla maapallolla ja sillä on ollut monopoliasema useimmissa paikannussovelluksissa. GPS:n lisäksi on kuitenkin olemassa muitakin satelliittipaikannusjärjestelmiä, kuten eurooppalainen Galileo, venäläinen GLONASS (Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema), kiinalainen BeiDou ja intialainen IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System). Maailmanlaajuisesta satelliittipaikannusjärjestelmästä käytetään termiä GNSS (Global Navigation Satellite System). Kaikki satelliittipaikannusjärjestelmät eivät ole globaaleja kuten GPS; esimerkiksi IRNSS perustuu geostationaariin ja geosynkronisiin satelliitteihin, joten paikannus onnistuu vain tietyllä alueella eli IRNSS:n tapauksessa Intian alueella. (Poutanen 2016, s.11–12)



Paikannussatelliittien signaalit koostuvat kantoaalloista, koodeista ja navigointiviesteistä. Signaalin ja erityisesti siihen moduloitujen koodien rakenne on monimutkainen, koska kyseessä on hajaspektritekniikka, joka on alun perin kehitetty sotilaskäyttöön. Monimutkainen rakenne mahdollistaa kuitenkin hyvin heikonkin signaalin luotettavan havaitsemisen ja erottamisen kohinasta. Paikannussatelliittien signaalit ovat korkeaenergistä sähkömagneettista säteilyä eli mikroaaltoja. Eri satelliittipaikannusjärjestelmät käyttävät eri aallonpituuskaistoja. Etäisyys satelliitin ja vastaanottimen välillä voidaan mitata käyttämällä signaalin moduloitua koodia. Koodin avulla päästään parhaimmillaan noin metrin mittaustarkkuuteen paikannuksessa. Tarkempaan, alle metrin ja jopa millimetrien mittaustarkkuuteen päästään mittaamalla etäisyys signaalin kantoaallon avulla. (Poutanen 2016, s.166, s.174, s.176–177)

Differentiaalisessa paikannuksessa (DGPS tai DGNSS) paikannuksen virhettä pyritään pienentämään differentiaalikorjauksella. Korjaukseen käytetään hyväksi tunnetussa pisteessä olevaa vastaanotinta eli tukiasemaa (base station). Tukiasema mittaa jatkuvasti paikannuksen poikkeamaa, ja paikannuksen korjaustieto välitetään vastaanottimelle. Virheet aiheutuvat muun muassa signaalin refraktiosta ilmakehässä sekä satelliittien ratavirheistä. Virheen pienentämisessä voidaan käyttää myös useiden tukiasemien muodostamaa verkkoa. Suomessa on käytössä FinnRef-tukiasemaverkko, jonka avulla päästään noin 0,5 m paikannustarkkuuteen kaikkialla Suomessa (Eskola & Peltoniemi 2011, s.87–88; Poutanen 2016, s.13–15, 257–258)

Yhä tarkempaan paikannukseen päästään käyttämällä kinemaattista suhteellista paikannusta, jossa liikkuvan vastaanottimen paikka määritetään kiinteän tukiaseman (tai tukiasemaverkon) suhteen mittauksen ajanhetkillä reaaliaikaisesti tai jälkilaskentana. Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus eli RTK (Real Time Kinematic) lienee käytetyin GNSS-sovellus tarvittaessa senttimetrin tarkkuutta. Käytetty tukiasema voi myös olla virtuaalinen (VRS, Virtual Reference Station) eli laskentakeskus muodostaa havaitsijan lähelle virtuaalisen tukiaseman, jolle generoidaan paikannusdataa. Käyttäjälle generoitu data näyttää samalta kuin paikalla olisi todellinen tukiasema. VRS-menetelmiä ja muita verkko-RTK -menetelmiä käyttämällä säästetään myös aikaa ja kustannuksia, kun omaa todellista tukiasemaa ei tarvitse pystyttää tarkkaa paikannusta varten. Suomessa on käytössä esimerkiksi Trimnet VRS-palvelu. RTK-tekniikkaa hyödyntävien paikannuslaitteiden tuottaman sijaintitiedon tarkkuuteen vaikuttaa muun muassa näkyvissä olevien satelliittien määrä. (Eskola & Peltoniemi 2011, s.87–88; Poutanen 2016, s.262–265)

Virtuaalisen tukiaseman muodostaminen voidaan tehdä myös jälkilaskentana. Jälkilaskentana tehdystä kinemaattisesta paikannuksesta käytetään termiä PPK (Post Processing Kinematic). Jälkilaskennassa voidaan hyödyntää myös tarkkaa tietoa satelliittien radoista ja niiden virheistä, joita ei reaaliaikaisessa paikannuksessa ole tiedossa. Jotta erilaisten paikannuslaitteiden tuottamaa dataa voitaisiin yhdistellä, useissa vastaanottimissa on käytössä datan RINEX-muunnos (Receiver Independent Exchange format). RINEX-formaatissa paikannusdata on ASCII-muodossa, joka on yhteensopiva useiden ohjelmistojen ja sovellusten kanssa. (Poutanen 2016, s.267)

RTK- ja PPK-tekniikoita hyödyntäviä RPAS-laitteita on jo markkinoilla. Muun muassa DJI on kehittänyt RTK-paikannusta hyödyntäviä multikoptereita. RTK-drooni on lennon aikana yhteydessä todelliseen tai virtuaaliseen tukiasemaan. Myös PPP-tekniikan (Precise Point Positioning) hyödyntämistä RPAS-toiminnassa on tutkittu. PPP-tekniikka mahdollistaa senttimetritarkkuuden paikannuksen ilman tukiasemien käyttöä. (DJI 2018, s.27; Poutanen 2016, s.15; Grayson et al. 2018)

### **2.3.3 RPAS-laitteiden autonomia**

RPAS-laitteiden käyttöä voidaan helpottaa autonomisilla toiminnoilla. Laitteen pilotoinnin yksinkertaistaminen vapauttaa pilotin tarkkailemaan lentoympäristöä, mikä tehostaa toiminnan riskienhallintaa. Useissa drooneissa on mahdollista käyttää autopilottia. Autopilotilla viitataan yleensä siihen, että drooni lentää aiemmin lentosuunnitelmassa määritetyn reitin itsenäisesti ilman ohjausta. Reitti voidaan määrittää lennonsuunnitteluohjelmistolla, jotka hyödyntävät esimerkiksi Googlen karttapohjia, joiden päälle haluttu lentoreitti piirretään. Kun lentosuunnitelma on ladattu drooniin, se lentää suunnitellun reitin autonomisesti käyttäen paikannusjärjestelmiään ja lentokorkeutta mittaavia sensoreitaan. Droonit voivat lähteä ohjelmoidulle reitille itsenäisesti maanpinnalta ja laskeutua samaan paikkaan lennettyään suunnitellun reitin. Itsenäinen lähtö onnistuu vain kopterityyppisiltä drooneilta, sillä kiinteäsiipiset droonit täytyy saattaa ilmaan. Useissa drooneissa on myös RTH-toiminto (Return To Home), jonka aktivoituessa drooni palaa automaattisesti ennalta määritettyyn kotipisteeseen, joka voi olla esimerkiksi lentoonlähtöpaikka. Kauko-ohjaimesta aktivoitava RTH-toiminto toimii vain ohjaimen ja droonin välisen yhteyden toimiessa.

RPAS-laitteiden autonomiaa on kehitetty autopilottia pidemmällekin. Dronit voivat hyödyntää esimerkiksi tutkalaitteita tai tietokonenäköä (computer vision) esteiden tunnistamisessa ja väistämisessä. Konenäköä ja tutkajärjestelmiä voidaan hyödyntää myös droonien turvallisessa laskeutumisessa pienelle alustalle, mistä on hyötyä esimerkiksi droonin lentäessä avovedellä ja sen laskeutuessa veneeseen.

Nykyisten säädösten mukaan RPAS-laitteiden määritelmään ei kuulu täysin autonomiset eli vapaastilentävät dronit, vaan ne on määritelty miehittämättömiksi ilma-aluksiksi (UAV). Autonomista droonia voidaan varastoida eräänlaisessa suojassa tai laatikossa, josta se voi itsenäisesti lähteä lentoon suojan katon auetessa. Se voi myös palata ennalta määritetyn reitin lennettyään takaisin samaan laatikkoon GNSS-paikannuksen ja konenäön tai tutkajärjestelmien avulla. "Drone in a box" eli "drooni laatikossa" on nimitys tälle uudelle autonomisten droonien konseptille. Edelleen autonomiaa voidaan kehittää laatikossa olevalla latausjärjestelmällä, joka lataisi droonin akun automaattisesti sen palatessa lennolta. Näin drooni on valmiina uuteen lentoon. Dronin keräämä aineisto voitaisiin siirtää aineiston käsittelypaikkaan langattomasti esimerkiksi pilvipalvelun kautta. "Drone in a box" -konseptia on suunniteltu käytettäväksi esimerkiksi rajavartioston tehtävissä (Tanskanen 2019).

### 3 MITTALAITTEET JA MENETELMÄT

RPAS-laitteisiin voidaan asentaa erilaisia mittalaitteita ja sensoreita hyötykuorman paino- ja kokorajoitusten puitteissa. Droonien suosituin käyttötarkoitus on ilmapalokuvien tuottaminen, mutta digitaalikameran tavoin myös drooneihin asennetut hyperspektrikamerat, lämpökamerat ja laserkeilaimet tuottavat ympäristön havainnoinnissa ja tutkimuksessa käytettävää kaukokartoitusdataa. Kaukokartoitusaineistoa analysoimalla on mahdollista saada tietoa esimerkiksi vesistöjen kasvillisuudesta tai vedenkorkeuden spataalisesta ja ajallisesta vaihtelusta. RPAS-laitteilla hankitun kaukokartoitusaineiston käsittely vaatii kuitenkin paljon resursseja, jotta tutkimuskohteen kannalta relevantti informaatio saadaan poimittua suuresta datamäärästä.

Käytetty sensori tulee valita käyttösovelluksen mukaan. RGB-kamerat soveltuvat useimpien ympäristön kohteiden visuaaliseen analysointiin, kun taas multi- ja hyperspektrikameroilla tuotetun aineiston tulkinta vaatii yleensä monimutkaisempaa prosessointia. RPAS-laitteita hyödyntävään ympäristön kohteiden kaukokartoitukseen liittyy oleellisesti sähkömagneettista säteilyä mittaavien kaukokartoitussensorien toimintaperiaatteet, joita tässä osiossa esitellään. RPAS-laitteita käytetään yleensä etämittaukseen, mutta niitä voidaan hyödyntää myös perinteisissä kontaktia vaativissa mittauksissa kuten näytteenotossa tai veden lämpötilaa mittaavan anturin käytössä.

#### 3.1 Kaukokartoituksesta

Kaukokartoitus (remote sensing) on etämittausta, jossa kohteesta, alueesta tai ilmiöstä kerätään aineistoa ilman fyysistä kontaktia siihen. Kaukokartoituksessa käytetään avaruudessa (spaceborne) tai ilmassa (airborne) sijaitsevia laitteita ja sensoreita. Kaukokartoitussensorit asennetaan esimerkiksi satelliittiin, lentokoneeseen, helikopteriin tai kauko-ohjattavaan ilma-alukseen, josta ne keräävät aineistoa muun muassa maanpinnasta, maan kasvipeitteestä, vesistöistä sekä myös ilmakehästä. Kaukokartoituksella viitataan yleensä Maan pinnan mittaukseen ja tutkimukseen, mutta samoja menetelmiä käytetään myös muidenkin avaruuden kohteiden tutkimuksessa. Etämittausmenetelmiä käytetään myös käsikäyttöisillä laitteilla maan pinnalla. Kaukokartoitusmenetelmien avulla voidaan tehdä ei-destruktiivisia mittauksia, jotka eivät häiritse tutkittavaa kohdetta. Ne myös mahdollistavat vaikeakulkuisen maaston vaivattoman ja turvallisen kartoitustyön.

Satelliittien tuottaman datan avulla voidaan kartoittaa ja seurata laajoja, jopa globaaleja, ilmiöitä, kuten metsäpalojen aiheuttaman savun leviämistä ilmakehässä. Satelliittikuvien käyttöä pienien kohteiden kartoituksessa rajoittaa kuvien pieni spatiaalinen resoluutio eli erotuskyky. Mitä korkeammalta maan pintaa kuvataan, sitä pienempi sensorin erotuskyky yleisesti on. Lentokorkeuden lisäksi tuotetun aineistoin resoluutioon vaikuttaa myös käytetyn sensorin ominaisuudet. Suuri resoluutio on tärkeää useissa ympäristön havainnoinnin ja kartoituksen sovelluksissa, joissa tunnistetaan, mitataan ja seurataan ympäristön kohteita. Satelliittien lisäksi kaukokartoitussensoreita käytetään usein lentokoneissa ja helikoptereissa, ja 2010-luvulta alkaen yhä useammin drooneissa. Drooneilla on mahdollista lentää lähellä maan pintaa, ja multikoptereilla voidaan myös leijua paikallaan, mikä mahdollistaa hyvin tarkan kaukokartoitusdatan tuottamisen.

Kaukokartoituksessa käytettävien RPAS-laitteiden hyötyjä satelliitteihin ja lentokoneisiin verrattuna ovat alhaisen lentokorkeuden mahdollistaman korkean resoluution lisäksi niiden liikkuvuus ja ohjautuvuus. Multikoptereilla, jotka pystyvät leijumaan ja liikkumaan kaikkiin suuntiin ilmassa, voidaan tehdä kaukohavaintoja paikoissa, jonne lentokoneisiin tai satelliitteihin asennetut kamerat eivät näe. Drooneilla voidaan kuvata esimerkiksi luolia tai pystysuoria seinämiä. Tällaisissa ympäristöissä paikannussatelliittien näkyvyyden heikentyminen voi kuitenkin estää droonin paikannusjärjestelmän toiminnan. RPAS-laitteiden käyttöä kaukokartoituksessa rajoittaa myös niiden lyhyt lentoaika sekä ohjausyhteyksien kantavuus. Multikoptereilla ei voida yhdellä lennolla kartoittaa spatiaalisesti laajoja alueita, vaan ne soveltuvat paikallisten ilmiöiden havainnointiin ja maaston kohteiden tarkkaan korkean resoluution kartoitukseen.

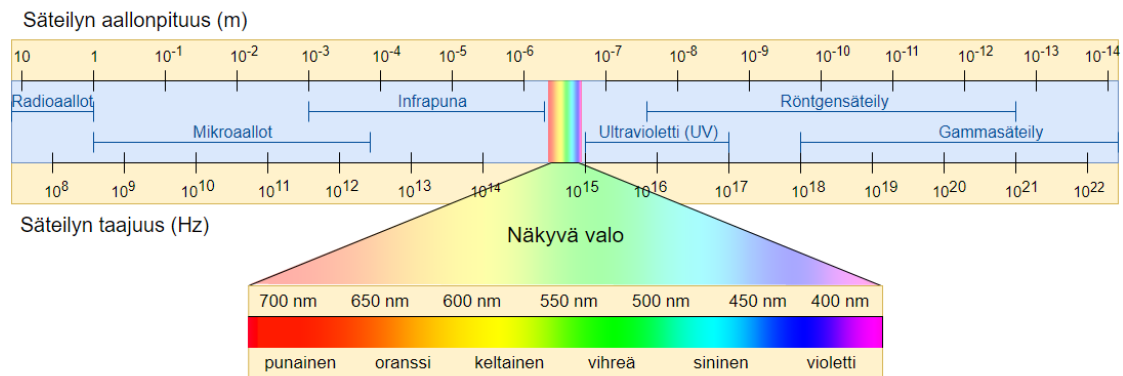
Kaukokartoitusmenetelmät perustuvat kuvauskohteiden heijastaman tai lähettämän sähkömagneettisen säteilyn mittaamisen. Sähkömagneettinen säteily on aaltoliikkeen tavoin kulkeutuvaa energiaa. Mitattu säteily voi olla peräisin luonnollisesta säteilylähteestä kuten Auringosta tai esimerkiksi mittalaitteiden omista säteilylähteistä, joista lähtevän säteilyn heijastumista mitataan. Sähkömagneettinen säteily vaihtelee alhaisen energian radioaalloista korkean energian gammasäteilyyn. Sähkömagneettisen säteilyn aaltojen nopeus on tyhjiössä aina vakio (valonnopeus  $c$ ), joten säteilyn aallonpituuden  $\lambda$  [nm] ja taajuuden  $f$  [Hz] suhde voidaan ilmoittaa yhtälön (1) mukaisesti. (Jones & Vaughan 2010 s.7–8)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Mitä suurempi säteilyn aallonpituus on, sitä pienempi taajuus sillä on. Säteilyn energia  $E_\lambda$  on verrannollinen säteilyn taajuuteen ja kääntäen verrannollinen säteilyn aallonpituuteen yhtälön (2) mukaisesti. Yhtälö ilmaistaan Planckin vakion  $h$  avulla. (Jones & Vaughan 2010, s. 9–10)

$$E_\lambda = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Sähkömagneettisen säteily jaetaan sen aallonpituuden mukaan osiin, mikä on esitetty sähkömagneettisen säteilyn spektrinä kuvassa 4. Kuvassa esitetyt aallonpituusalueiden rajat ovat likimääräisiä.



Kuva 4 Sähkömagneettinen spektri (mukaillen Young & Freedman 2012)

Ainoa ihmissilmällä havaittavaa säteilyä sanotaan näkyväksi valoksi. Näkyvän valon aallonpituusalue on noin 380–750 nm. Tavallinen, ”valkoinen” valo koostuu kaikista ihmissilmällä nähtävistä aallonpituuksista eli väreistä. Eri värien aallonpituusalueet on tarkemmin esitetty taulukossa 1. Näkyvän valon spektristä voidaan eristää hyvin kapeita aallonpituusalueita, jolloin eristetty säteily on monokromaattista eli yksiväristä valoa. (Young & Freedman 2012, s.1054–1055)

Taulukko 1 Näkyvän valon värien aallonpituusalueet (Young & Freedman 2012, s.1054)

Väri	Aallonpituusalue
Violetti	380–450 nm
Sininen	450–495 nm
Vihreä	495–570 nm
Keltainen	570–590 nm
Oranssi	590–620 nm
Punainen	620–750 nm

Ympäristössämme kaikkien kohteiden havaittu väri määräytyy sen mukaan millaista säteilyä eli minkä väristä valoa niiden pinta heijastaa. Väriteorian mukaan valkoista valoa voidaan analysoida kolmen päävärin eli punaisen, vihreän ja sinisen mukaan. Kaikki värit voidaan tuottaa näitä kolmea valon pääväriä yhdistelemällä. Jos kohde on sinisen värinen, kun sitä valaistaan tavallisella valkoisella valolla, kohde absorboi punaista sekä vihreää valoa ja heijastaa sinistä. (Jones & Vaughan 2010, s.20)

Erilaiset pinnat heijastavat näkyvän valon lisäksi muutakin säteilyä eri tavoin pinnan ominaisuuksien mukaan. Havaitusta heijastusspektristä voidaan vastaavasti päätellä pinnan ominaisuuksista. Näitä ominaisspektrejä käytetään tunnistamaan tiettyjen kohteiden läsnäolo kaukokartoitusdatan avulla. Kaukokartoitusinstrumentit voidaan myös kalibroida havainnoimaan vain tietyille kohteille ominaisen säteilyn aallonpituusalueita.

### 3.2 Datan hankinta

Yhä useammat kaukokartoitusinstrumentit voidaan asentaa lentokoneen tai satelliitin lisäksi myös drooniin. Droonien käyttö kaukokartoituslaitteiden alustana mahdollistaa joustavuuden datan hankinnassa; drooni on helppo siirtää kartoitettavaan kohteeseen ja mittaus voidaan suorittaa milloin vain, kunhan sääolosuhteet ovat droonin lennättämiselle suotuisat. RPAS-laitteita käytetäänkin niiden nopean käyttöönoton takia hyödyksi pelastustöissä sekä esimerkiksi tulvien seurannassa.

Kaukokartoitussensoreita on kehitetty hyödyntämään sähkömagneettisen säteilyn eri ominaisuuksia kuten sen aallonpituutta ja vuorovaikutusta erilaisten pintojen kanssa.

Kaukokartoitussensoreita voidaan luokitella niiden hyödyntämän säteilyn aallonpituuskaistan mukaan, käyttökohteen mukaan tai toimintaperiaatteen mukaan. Luokittelu voi myös perustua siihen, ovatko sensorit kuvantavia vai eivät. Kuvantavat sensorit muodostavat niiden ilmaisimelle kuvan niiden kartoittamasta alueesta. Ei-kuvantavat sensorit taas mittaavat tiettyä parametriä, kuten etäisyyttä. Niidenkin mittaamat tulokset voidaan esittää kuvana aineiston käsittelyn jälkeen.

Toimintaperiaatteensa mukaan kaukokartoitussensorit jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin sensoreihin. Passiiviset sensorit mittaavat itsenäisen säteilylähteen säteilyä. Kyseessä voi olla tutkitun kohteen pinnasta heijastunut Auringon valo tai kohteen emittoima lämpösäteily. Aktiiviset sensorit sekä lähettävät että mittaavat säteilyä. Aktiivisen sensorin lähettämä säteily heijastuu takaisin mitattavan kohteen pinnalta ja sensori vastaanottaa heijastuneen säteilyn. Esimerkiksi laserkeilaus on aktiivista sensoria hyödyntävä mittausmenetelmä. (Jones & Vaughan 2010, s.99–100)

RPAS-laitteisiin asennettuja sensoreita käytettäessä droonin lentoreitti tulee suunnitella ottaen huomioon sensorin ominaisuudet ja operoinnin rajoitukset. Passiiviset sensorit tarvitsevat toimiakseen riittävän voimakasta säteilyä. Esimerkiksi ilmavalokuvaus ei onnistu ilman auringonvaloa. Droonin lentokorkeus täytyy säätää sellaiseksi, että koko tutkimusalue pystytään kartoittamaan.

Jotta kaukokartoitusaineistoa voidaan käyttää tehokkaasti hyödyksi ympäristön havainnoinnissa ja tutkimuksessa, on aineiston oltava tarpeeksi tarkkaa. Käytetyn sensorin erotuskyky eli resoluutio määrittelee myös sen tuottaman datan erotuskyvyn. Spatiaalinen resoluutio tarkoittaa kerätyn aineiston yksityiskohtien määrää. Esimerkiksi ilmavalokuvauksessa sillä tarkoitetaan yhden kuvapikselin kuvaaman alueen kokoa maastossa. Sensorin spatiaalisen resoluution määrittelee sen optiset ominaisuudet kuten näkökenttä (field of view) sekä sen etäisyys kuvattavasta kohteesta.

Valokuvauksessa ja kuvankäsittelyssä termillä resoluutio voi olla monta eri merkitystä. Kuvantoistolaitteissa resoluutiolla tarkoitetaan kuvantoistolaitteen erottelukykä, joka voidaan ilmaista pikselien määränä pituusyksikköä kohden. Kuvantoistolaitteiden resoluution yksikkönä käytetään usein pisteiden määrää tuumalla (dots per inch) eli dpi. Valokuvauksessa termiä resoluutio käytetään myös kuvan muodostavien pikselien määrästä. Esimerkiksi 4K-resoluutioinen (ultrateräväpiirtoinen) kuva koostuu 3840×2160 pikselistä.



Radiometrinen resoluutio tarkoittaa sensorin kykyä jakaa mitattu signaali eri intensiteettitasoihin. Vastaavasti se tarkoittaa hankitusta datasta erotettavien selkeiden intensiteettitasojen määrää. Mustavalkovalokuvauksessa (greyscale) radiometrinen resoluutio tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka moneen eri harmaan sävyyn valokuva voidaan jakaa. Sensorin radiometristä resoluutiota kuvataan bittisyvyydellä. Esimerkiksi 8-bitin resoluution digitaalisessa mustavalkovalokuvassa mahdollisia harmaan sävyjä on 256. Mitä suurempi sensorin radiometrinen resoluutio on, sitä pienempiä energiatasojen eroja se pystyy havaitsemaan ja mittaamaan. (Jones & Vaughan 2010, s.93)

Sensorin spektraalinen resoluutio tarkoittaa sen kykyä erottaa sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueita. Se määrittää sensorin mittaamien sähkömagneettisen säteilyn kaistojen lukumäärän ja leveyden. Aineiston temporaalinen resoluutio tarkoittaa yksittäisten mittausten välistä aikaa. Droonin kamera voidaan asettaa ottamaan valokuva esimerkiksi joka toinen sekunti. (Jones & Vaughan 2010, s.94)

### 3.3 Datan käsittely

Kaukohavaintojen tulkitsemiseen kuluu yleensä paljon resursseja aineiston suuren määrän ja tiedostokoon takia. Yleensä RPAS-laitteilla kerätty data siirretään prosessointitietokoneelle, mutta myös pilvipalveluita voidaan käyttää. RPAS-laitteilla hankitun datan spatiaalinen resoluutio on yleensä suuri matalan lentokorkeuden ansiosta, joten kartoitetun ympäristön yksityiskohdat ovat helposti erotettavissa esimerkiksi valokuvista. Korkea resoluutio tarkoittaa kuitenkin myös suuria tiedostokokoja, mikä tulee käytännössä huomioida aineistojen varastoimisessa ja digitaalisessa käsittelyssä. Myös tiedonsiirto ja sen nopeus voi myös muodostua haastavaksi hankittujen aineistojen tiedostokokojen ollessa suuria. Kaukokartoitusaineistoja voidaan nykyään hyödyntää yhä tehokkaammin ja monipuolisemmin tietotekniikan ja tietokoneiden laskentakyvyn kehityksen ansiosta. Nykyaikaisten grafiikkaprosessorien sekä verkkolaskennan (grid-based computing) käyttäminen mahdollistaa kaukokartoitusdatan monipuoliset hyödyntämismahdollisuudet esimerkiksi hydrologisessa mallinnuksessa. (Honkavaara et al. 2018; Langhammer et al. 2017)

Kaukokartoitusaineistoa kuten ilmavalokuvia voidaan tulkita myös visuaalisesti. Tulkinnan helpottamiseksi aineiston hankinnan eli mittaus- ja kartoituslentojen suunnittelu on tärkeää, jotta aineiston keruu kohdistetaan tarkasti tutkittavaan kohteeseen, jotta ylimääräistä aineistoa ei syntyisi suuria määriä.

Ympäristön tutkimuksessa tutkimuksen kannalta olennaiset kaukokartoitusaineiston ominaisuudet ja parametrit voidaan saada selville myös tiedonlouhinnan (data mining) keinoin. Datan analysoimiseksi voidaan käyttää automatisoituja ohjelmistoja. Suurten tietomäärien analysointiin käytetään myös tekoälyä, jonka avulla aineistosta voidaan havaita tutkittavat kohteet ja ominaisuudet. Kaukokartoitusdatan analysoinnin helpottamiseksi on kehitetty myös aineistoa matemaattisesti käsittelemällä muodostettuja indeksejä.

### 3.3.1 Datan georeferointi

Jotta kerättyä aineistoa voidaan käyttää maastomittauksissa sekä muissa ympäristön kuvauksen ja mittauksen sovelluksissa, on aineistoon lisättävä sijaintia koskeva tieto. Georeferointi tai geotaggaus (geotagging) tarkoittaa sijaintitiedon lisäämistä aineistoon kuten valokuviiin. Se on oleellinen osa kaiken kaukokartoitusdatan käsittelyä mutta etenkin silloin, kun aineistoa käytetään maastomittauksissa tai mallintamisessa.

Georeferoidut aineistot voidaan siirtää haluttuun koordinaatistoon, mikä mahdollistaa niiden käytän erilaisissa karttaesityksissä. Suomessa on ollut yleisessä käytössä kartasto-koordinaattijärjestelmä (KKJ), jonka tilalle on kuitenkin tullut yhteiseurooppalaisen ETRS89-referenssijärjestelmän suomalainen realisaatio EUREF-FIN. Julkisen hallinnon suosituksen mukainen suomalainen tasokoordinaattijärjestelmä on ETRS-TM35FIN, missä ETRS viittaa vertausjärjestelmään European Terrestrial Reference System, TM karttaprojektion tyyppiin (poikittainen Mercator) ja 35 UTM-kaistaan. Suomen valtakunnallinen korkeusjärjestelmä on N2000, mutta käytössä on edelleen myös aikaisempia korkeusjärjestelmiä kuten N43 ja N60. (Poutanen 2016, s.32, s.50, s. 52, s.69)

Aineiston georeferointiin voidaan käyttää RPAS-laitteen paikannusjärjestelmän rekisteröimiä tietoja droonin asennetun mittalaitteen paikasta ja asennosta mittaushetkellä. Sensorin asento, kuten sen kallistuminen ja kääntyminen, määritetään inertiamittaussensoreilla (IMU-sensorit). Droonin tai sen hyötykuorman GNSS-paikannusjärjestelmät rekisteröivät RPAS-laitteen sijainnin xyz-koordinaatistossa ja lentokorkeuden määrittämiseen voi olla käytössä myös korkeusmittareista kuten barometreja. Tarkin sijaintitieto saadaan käyttämällä tukiasemia hyödyntäviä RTK- ja PPK-tekniikoita.

RPAS-laitteilla tehtävän ilmavalokuvauksen sijaintitiedon validoimiseksi ja tarkkuuden lisäämiseksi käytetään myös kuvattavaan maastoon sijoitettavia kiintopisteitä (GCP,

Ground Control Points), joiden sijaintitieto määritetään RPAS-järjestelmään kuulumattomalla paikantimella. Kiintopisteet voivat olla mitä vain maastosta helposti erotettavia kohteita, joiden tarkka sijaintitieto on mitattavissa esimerkiksi RTK-GNSS-paikantimella. Kiintopisteet on nähtävä ilmasta otetuista valokuvista, joten ne eivät voi sijaita esimerkiksi puiden tiheän latvuston alla. Ne voivat myös olla maastoon erikseen asetettuja, valokuvista helposti havaittavia maastosignaaleja.

Georeferoituja RPAS-laitteilla hankittuja kaukokartoitusaineistoja voidaan käyttää myös paikkatietojärjestelmissä (GIS, Geographic Information System). Paikkatietojärjestelmiä voidaan vesivaratehtävissä hyödyntää muun muassa vesivaroja koskevat paikkatiedon spatiaalisessa analyysissä, mallinnuksessa, visualisoinnissa ja myös aineistojen käsittelyssä sekä prosessoinnissa. (Wang & Xie 2018)

### **3.3.2 Datan geometrinen ja radiometrinen korjaus**

RPAS-laitteilla hankitussa kaukokartoitusaineistossa esiintyy satunnaisia ja systemaattisia virheitä, jotka aiheutuvat esimerkiksi droonin epävakaudesta tai muusta odottamattomasta liikkeestä, droonin paikannusjärjestelmää häiritsevistä sähkömagneettisista kentistä tai kauko-ohjaajan tekemästä inhimillisestä virheestä. Selvästi virheelliset mittaus tulokset eli outlierit voidaan jättää aineiston käsittelyn ulkopuolelle, mutta niitä aiheuttavat virhelähteet tulee selvittää. Systemaattisia virheitä voidaan korjata aineiston käsittelyssä.

Kaukokartoitusinstrumenteilla hankitut raaka-aineistot tarvitsevat tyypillisesti geometrisiä ja radiometrisiä korjauksia, jotta niitä voidaan analysoida ja muokata helposti tulkitavissa oleviksi esityksiksi. Ilmavalokuvissa havaittava kameran ja kuvattavan kohteen etäisyys on valokuvassa vaihteleva. Se johtuu siitä, että kuvakulma kasvaa nadiirista kohti kuvatun alueen reunoja. Tästä aiheutuu ilmavalokuvien vääristymiä, jotka ovat helposti havaittavissa suoraan metsän yläpuolelta otetuissa ilmakuvissa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 5. Myös paikalliset maaston pinnanmuodot aiheuttavat vaihtelua valokuvan mitakaavassa. Ilmavalokuvien vääristymiä korjataan niin kutsutun orto-oikaisun avulla. Digitaalisessa orto-oikaisussa hyödynnetään georeferointimenetelmiä kuten maastosignaalien käyttöä. Ilmavalokuvan pikselit projektoidaan (reprojection) uudelle hilalle (grid) ja uusien pikselien arvot lasketaan uudelleen (resampling). Samankaltaisia vääristymiä

esiintyy ilmavalokuvien lisäksi muissakin kaukokartoitusmenetelmissä. Useita ortokorjattuja ilmavalokuvia yhdistämällä pystytään luomaan laajoja alueita kattavia ortomosaikkeja. (Jones & Vaughan 2010, s.128–130, s.132)



Kuva 5 Ilmavalokuvan vääristymä havaitaan puiden näennäisenä kallistumisena nadiirista poispäin

Aineiston radiometriseen korjaukseen kuuluu muun muassa kohinan poisto. Aineistossa havaittu kohina voi olla satunnaista tai systemaattista. Satunnainen kohina voi aiheutua mittaussensorin toimintaa häiritsevistä elektronisista interferenssistä tai datan rekisteröinnin epäsäännöllisistä katkoksista. Satunnaista kohinaa voidaan korjata suodattimien avulla. Suodattimet voivat määrittää virheellisen arvon omaavan pikselin uudelleen sitä ympäröivien pikselien arvojen keskiarvona. Liiallinen suodatus voi kuitenkin poistaa aineiston aitoja intensiteettivaihteluja ja tietoja voi hävitä, joten suodattimia tulee käyttää harkiten. Systemaattinen kohina aiheutuu yleensä sensorin viasta. (Jones & Vaughan 2010, s.134–135)

Radiometrisiä virheitä voi aiheutua myös vaihtelevista kuvaus- tai mittauskulmasta. Kohteiden heijastavuus samoin kuin niiden valaisu (illumination) vaihtelee tarkastelukulman mukaan, joten eri kulmista tehdyt mittaukset saavat eri tuloksia. Kohteiden valaisuun vai-

kuttaa myös päivän aika ja sääolosuhteet, jotka määrittelevät maanpinnalle päätyvän auringonvalon määrän ja kulman. Jos tarkastelun kohteena on ilmavalokuvan kohteen väri, on valon ja varjojen aiheuttama väriero korjattava. (Jones & Vaughan 2010, s.135–138)

### 3.4 Ilmavalokuvaus

Valokuvaus on kuluttajille suunnattujen droonien suosituin käyttökohde. Kuluttajaystävällisiä kuvauskoptereita eli valokuvaukseen tarkoitettuja multikoptereita on saatavilla suoraan kaupan hyllyltä ja niillä voidaan tuottaa valokuvia ja videokuvaa eri käyttötarkoituksia varten. Drooneilla hankittua kuvamateriaalia käytetään niin viihdeteollisuudessa kuin tutkimuksessakin. Kamera voi olla integroitu drooniin tai tavallinen järjestelmäkamera on kiinnitetty RPAS-laitteeseen ja sen laukaisin on yhdistetty droonin radio-ohjaimeen.

RPAS-laitteilla otettujen valokuvien laatuun vaikuttavat käytetyn kameran ominaisuudet, sääolosuhteet ja droonin vakaus. Myös päivänajan mukaan vaihteleva valoisuus vaikuttaa kuvien laatuun. Hämärässä otettujen valokuvien laatu ei ole optimaalinen niiden tulkitsemista varten ja toisaalta kirkkaana päivänä Auringon paistaessa otetuissa valokuvissa näkyvät varjot voivat aiheuttaa vääriä tulkintoja. Vesi- ja lumisateella tai sumussa näkyvyys heikkenee. Automaattitarkennusta käyttävä digitaalikamera voi myös tarkentaa lumihiutaleisiin kuvattavan kohteen sijasta (kuva 6).



Kuva 6 Lumihiutaleisiin automaattisesti tarkentunut ilmavalokuva, jota ei voitu hyödyntää maaston kartoituskäytössä

Järjestelmäkamera voidaan asentaa drooniin kiinnitettyyn kameratelineeseen tai vakauttimeen eli gimbaaliin. Gimbaalin käyttö vähentää droonin epävakaudesta aiheutuvia valokuvien heilahduksia ja tärähdyksiä. Kamerateline mahdollistaa valokuvien ottamisen erilaisista kuvakulmista, jos kameran kallistuskulmaa ja suuntaa voidaan muuttaa. Maaston kartoituksessa käytetään yleensä suoraan ylhäältä otettuja nadiirikuvia, joita yhdistelemällä kuvankäsittelyohjelmistolla voidaan luoda laajojen alueiden ortoilmakuvia. Ilmavalokuvien spatiaalinen resoluutio ilmoitetaan yleensä maapikselin kokona eli pikselin suhteellinen koko kohteen pinnalla (GSD, Ground Sampling Distance). Aineiston GSD riippuu käytetyn kameran optisista ominaisuuksista sekä kameran alustan kuten droonin lentokorkeudesta.

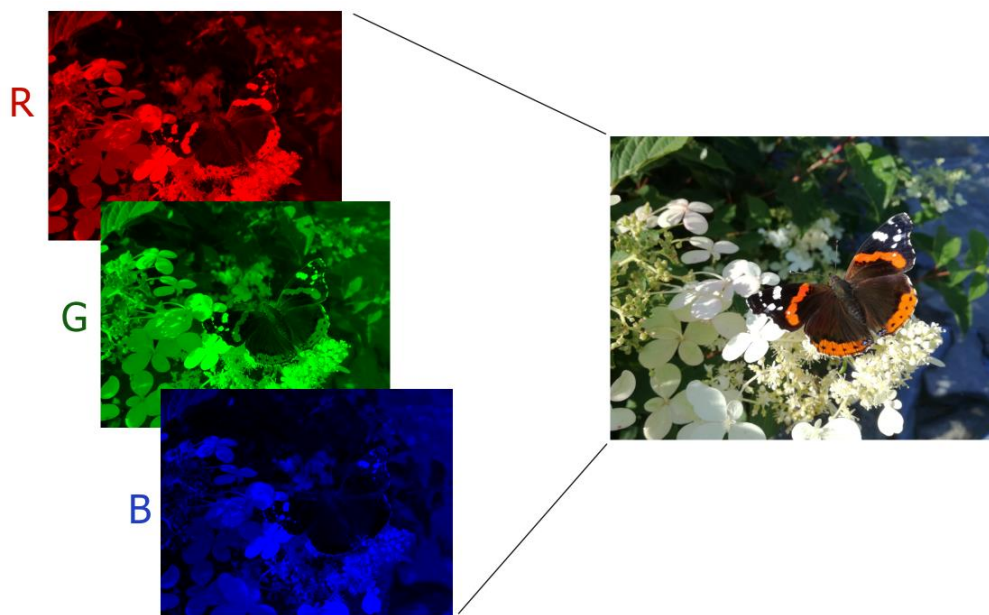
Ympäristön havainnoinnissa käytetään myös videokuvaa. Videokameroissa ympäristön havainnoinnin kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi digitaalinen zoomausmahdollisuus tai zoom-objektiivi sekä tuotetun aineiston resoluutio.

### 3.4.1 Digitaalikamerat ja digitaalisten valokuvien käsittely

Digitaalikameran toiminta perustuu näkyvän valon tai muun sähkömagneettisen säteilyn muuntamiseksi digitaaliseen muotoon. Analoginen signaali muutetaan lukuarvoiksi A/D-muuntimella (analogia-digitaalimuunnin). Digitaalikameroissa käytetään CCD-kennoja

(charge-coupled device) tai CMOS-kennoja, joiden fotodiodit havaitsevat kennolle tulevien fotonien eli valon määrää. Kennot tallentavat tiedon havaitusta valosta digitaalisena pikselien matriisina. Jokaiselle pikselille määritetään lukuarvo kuvastamaan pikselin kirkkautta tai väriä. Useimmat kamerat käyttävät 12- tai 14-bittistä A/D-muunninta, eli signaali muutetaan 12- tai 14-bittiseksi lukuarvoksi. 14-bittisellä muuntimella lukuarvo on välillä 0–16384, koska jokainen bitti voi saada arvokseen 0 tai 1 ( $2^{14} = 16384$ ). Mitä suurempi bittisyvyys, sitä parempi värien erotuskyky eli radiometrinen resoluutio sensorilla on. Toisin sanoen 14-bitin bittisyvyudessa yhdellä pikselillä on 16384 mahdollista eri väri vaihtoehtoa, kun taas 8-bitin bittisyvyudessa mahdollisia vaihtoehtoja on vain 256. (Long 2013, s.99–100)

Harmaasävykuissa tämä pikselin lukuarvo kuvastaa vain yhden sävyn kirkkautta eli käytössä on vain yksi värikaista. Värikkiset RGB-kuvat koostuvat kolmesta eri värikaistasta: punainen (red), vihreä (green) ja sininen (blue). Nämä kolme väriä ovat väriteorian mukaan valon päävärit, joita yhdistelemällä voidaan tuottaa kaikki muut värit. Digitaalisten näyttöjen pikseleissä on punaisen, vihreän ja sinisen värinen valonlähde, joiden kirkkautta muuttamalla näyttö tuottaa eri värejä. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki digitaalisesta RGB-kuvasta ja sen kolmesta värikaistasta. Huomataan, miten sinisen värin kaistalla perhosen siipien oransseja kuvioita ei juurikaan näy, kun taas punaisen värin kaistalla ne erottuvat kirkkaimmin. (Long 2013, s.6)



Kuva 7 Esimerkki RGB-kuvan kaistoista



Kameran objektiivi eli linssijärjestelmä keskittää valonsäteet kuvakennolle ja objektiivin polttoväli (focal length) määrittää kuvatun alueen koon eli kameras näkökentän (field of view). Valonkeräyskykyyn taas vaikuttaa kameras objektiivin valotusaukon koko. Objektiivista riippuvainen näkökenttä sekä kameras etäisyys kuvattavasta kohteesta määräävät tuotettujen ilmavalokuvien spatiaalisen resoluution. Käytetty objektiivi valitaan käyttötarkoituksen ja kuvauskohteen mukaan. Kartoitustarkoituksessa tehtävässä ilmavalokuvauksessa käytetään yleensä objektiivia, joka vääristää valokuvattavan maaston muotoja ja yksityiskohtia mahdollisimman vähän. Esimerkiksi kalansilmäobjektiivin polttoväli on hyvin lyhyt, minkä takia kuvakulma on lähes 180 astetta. Näin suuri kuvakulma aiheuttaa niin kutsutun tynnyrivääristymän, joka vaikeuttaa valokuvan tulkintaa kartoitus- ja mitaustehtävissä. Kauko-objektiivien polttoväli on suuri eli niitä hyödyntämällä voidaan tuottaa suuren spatiaalisen resoluution kuvamateriaalia kaukana sijaitsevista kohteista. Kauko-objektiivit ovat kuitenkin myös fyysiseltä kooltaan suuria, mikä rajoittaa niiden käyttöä RPAS-laitteissa. (Long 2013, s.19)

Digitaalikameroiden tuottamien valokuvien resoluutiolla tarkoitetaan kuvan muodostamien pikselien määrää, joka ilmoitetaan yleensä megapikseleinä eli miljoonina pikseleinä. Pelkkä pikseleiden määrä ei takaa kuvan laadukkuutta vaan huomiota on kiinnitettävä myös kuvaushetken valoisuuteen ja kameras optiikkaan. Drooneissa käytetyissä kameroissa tulee huomioida myös kameras valotusaika (suljinaika). Se ilmoitetaan sekunnin murto-osina, esimerkiksi 1/250 s, jota voidaan merkitä myös sen käänteislukuna 250. Liikkuvien droonien kameroiden liian pitkä valotusaika tuottaa epätarkkoja valokuvia, sillä kuvattava kohde ei pysy paikoillaan valotuksen aikana.

Droonilla otettujen valokuvien käsittely vaihtelee kuvien käyttötarkoituksen mukaan. Käytännön RPAS-toiminnassa on huomioitava myös droonikuvauksella tuotettujen digitaalisten valokuvien tiedostokoko, jonka suuruus vaihtelee käytetyn kameras ja sen resoluutioiden mukaan. Droonilla tuotettu kuvamateriaali on usein tiedostokooltaan suurta aineiston suuren spatiaalisen resoluution takia, mikä voi asettaa vaatimuksia käytetyillä kuvankäsittelyohjelmistoille ja niitä pyörittäville tietokoneille. Jos ilmavalokuvista halutaan tuottaa ortokuva, on niiden geometriset vääristymät korjattava. Kuvassa 8 on esitetty 74 erillisestä ilmavalokuvasta (lentokorkeus 150 m) yhdistetty ortokorjattu kuva, joka käsittää noin 26 hehtaarin alueen. RPAS-laitteiden ottamien valokuvien yhdistämiseen ja ortokuvien luomiseen käytetään esimerkiksi fotogrammetriaohjelmistoja, jotka suorittavat valokuvien orto-oikaisun automaattisesti.





Kuva 8 Jokiuomasta ja sen läheisistä peltoalueista Pix4Dmapper-fotogrammetria-ohjelmistolla luotu orto-oikaistu ilmakuva

### 3.4.2 Fotogrammetriset menetelmät

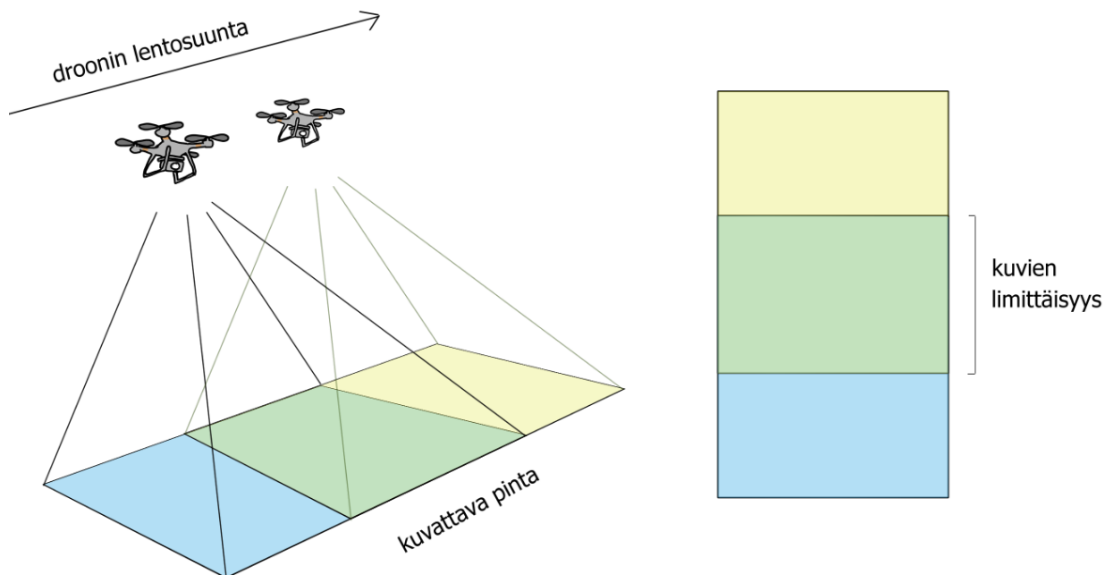
Fotogrammetria (photogrammetry) on etäisyyksien mittaamista ja kohteiden muodon mallintamista valokuvien avulla. Fotogrammetrisia menetelmiä käytetään nykyään paljon droonilla otettujen ilmakuvien analysointiin. Ne mahdollistavat digitaalisten maasto- ja korkeusmallien luomisen valokuvien avulla. Fotogrammetriamittauksia on tehty jo ilma-valokuvauksen alusta asti, mutta fotogrammetriset menetelmät maastomittauksessa ja 3D-mallintamisessa ovat huomattavasti lisääntyneet 2010-luvulla. UAS-fotogrammetriasta on tullut kustannustehokas keino tuottaa tarkkoja digitaalisia maastomalleja kartoitus- ja tutkimustehtävissä. Fotogrammetristen menetelmien yleistyminen on pitkälti GNSS-paikannuksen, digitaalisen valokuvauksen sekä UAS-laitteiden kehityksen ansiota. Fotogrammetrisia menetelmiä käytetään kartoituksen lisäksi rakennetun

ja luonnonympäristön seurannassa ja mallinnuksessa, arkeologiassa sekä myös esimerkiksi virtuaalitodellisuuden luomisessa.

Fotogrammetristen menetelmien taustalla on stereokuvaus, joka voidaan rinnastaa normaalisti näkevän ihmisen syvyysnäköön. Stereokuvauksessa samasta kohteesta otetaan kuva kahdesta eri perspektiivistä. Kuvat ovat osaksi limittäin, eli tietyt osat kohteesta näkyvät molemmissa kuvissa mutta erilaisesta näkökulmasta. Tämä mahdollistaa kohteen etäisyyden havaitsemisen 2D-kuvista. Kohteen kolmiulotteisuutta voidaan mallintaa edelleen tarkemmin, kun kuvakulmia on useita. Nykyaikaisessa digitaalisessa fotogrammetriassa valokuvatuista kohteista voidaan tuottaa 3D-malleja automaattisesti käyttäen fotogrammetriaohjelmistoja. Nykyisin on tarjolla useita droneilla otettujen ilmakuvien fotogrammetriseen käsittelyyn tarkoitettuja ohjelmistoja, joista suosittuja ovat esimerkiksi sveitsiläinen Pix4Dmapper ja venäläinen Agisoft Metashape.

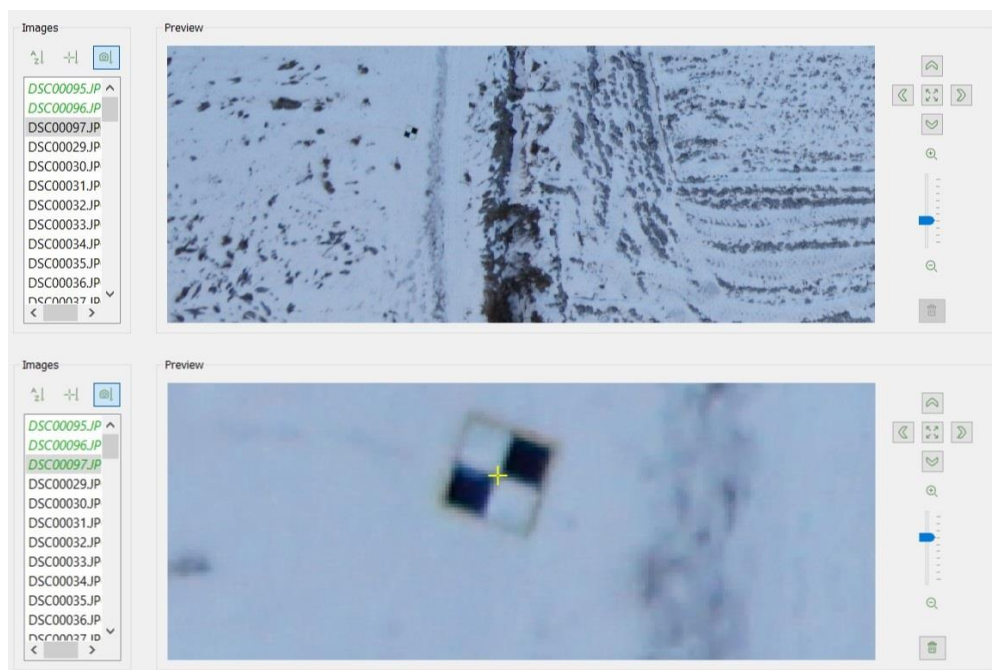
Useat fotogrammetriamenetelmät tarvitsevat kameran sijaintitiedon ja orientaatiotiedon kuvanottohetkellä tai kuvissa näkyvien maastosignaalien sijaintitiedon 3D-mallin rekonstruktiota varten. RPAS-laitteiden paikannusjärjestelmät sekä laitteen asentoa mittaavat IMU-sensorit voivat rekisteröidä nämä tiedot datan keruun ajalta. Esimerkiksi Pix4Dmapperiin voidaan syöttää käytetyn kameran sijainti- ja asentotieto jokaisen ohjelmistossa käsiteltävän valokuvan kuvanottohetkellä. Useat fotogrammetriaohjelmistot toimivat myös ilman aineiston georeferointia, sillä ne hyödyntävät Structure from Motion -tekniikkaa (SfM), joka ratkaisee kameran asennon ja mallinnettavan kohteen geometrian yhtäaikaaisesti ja automaattisesti käyttäen hyödyksi limittäisissä valokuvissa havaittuja yksityiskohtia (tie points). SfM-tekniikka mahdollistaa kuvatun kohteen 3D-mallinnuksen georeferoimattomien valokuvien avulla. SfM-tekniikassa käytetään DIM-algoritmeja (Dense Image Matching), jotka automaattisesti havaitsevat useissa eri valokuvissa näkyviä yksityiskohtia. SfM-algoritmit voivat käyttää myös varjoja kiintopisteinä, joten fotogrammetrista käsittelyä varten otetut valokuvat kannattaa ottaa samalla lennolla tai samaan päivän aikaan. Fotogrammetriaohjelmistot tuottavat valokuvista havaittujen kiintopisteiden perusteella pistepilven kartoitetusta kohteesta. Pistepilvistä voidaan luoda edelleen tihennettyjä pistepilviä, ortokuvia sekä digitaalisia korkeus- ja maastomalleja. (Sallach et al. 2018; Westoby et al. 2012)

Jotta kartoitettavan maaston yksityiskohtia olisi havaittavissa useissa eri ilmapalokuvissa, on valokuvien oltava limittäin (kuva 9). RPAS-laitteen lentonopeus sekä kuvanottofrekvenssi määrittelevät kuvien limittäisyyden. Kuvien limittäisyydeksi (overlap) suositellaan Pix4Dmapper-ohjelmistoa käytettäessä lentosuunnassa 75 prosenttia ja leveyssuunnassa 60 prosenttia (Pix4D 2020), mutta suositus vaihtelee käytetyn ohjelmiston ja mallinnettavan kohteen mukaan. Mitä enemmän kuvat ovat päällekkäin, sitä enemmän DIM-algoritmeilla on hyödynnettävissä kiintopisteitä (tie points). Toisaalta liiallinen päällekkäisyys lisää 3D-rekonstruktion laskentaan ja 3D-pistepilvien tuottamiseen vaadittavaa laskentatehoa, mikä yleensä käytännössä tarkoittaa pidempää laskenta-aikaa. Useissa lennon suunnitteluohjelmistoissa voi suoraan määritellä kuvien limittäisyys, jonka ohjelmisto automaattisesti muuttaa kuvanottofrekvenssiksi, kun droonin lentonopeus on määritelty.



Kuva 9 Droonilla otettujen ilmakuvien limittäisyys

Jotta kuvatusta kohteesta rekonstruoitua 3D-mallia voidaan käyttää maastomittauksessa ja kartoituksessa, on se georeferoitava ja vietävä haluttuun koordinaatistoon. Georeferointia varten tarvitaan fotogrammetriaohjelmiston käsittelemissä valokuvissa havaittavia kiintopisteitä, joiden tarkat koordinaatit tunnetaan. Kartoitettavasta maastosta voidaan valita valokuvista helposti tunnistettavia kohteita, joiden sijainti selvitetään käyttämällä esimerkiksi RTK-GNSS-paikannuslaitetta. Yleensä käytetään mustavalkoisia maastosignaaleja, jotka kuitenkin voivat olla vaikeasti tunnistettavissa lumipeitteisestä maanpinnasta otetuista valokuvista kuten kuvassa 10 on havainnollistettu.



Kuva 10 Maastosignaalien merkitseminen Pix4Dmapper-fotogrammetriaohjelmistossa

Maastosignaaleja suositellaan levitettävän kartoitettavan alueen nurkkiin sekä satunnaisesti sen keskelle. Martínez-Carricondo et al. (2018) ovat tutkineet tarkkojen korkeusmallien tuottamista varten tarvittavien maastosignaalien määrää. Maastosignaalien asettelu kartoitettavan alueen reunoille vähentää virheitä etäisyyksien ja maastonmuotojen mallinuksessa. On myös suositeltavaa käyttää kartoitetun alueen keskiosissa 0,5–1 maastosignaalia hehtaarilla maaston korkeuden mallinnuksen virheiden minimoimiseksi.

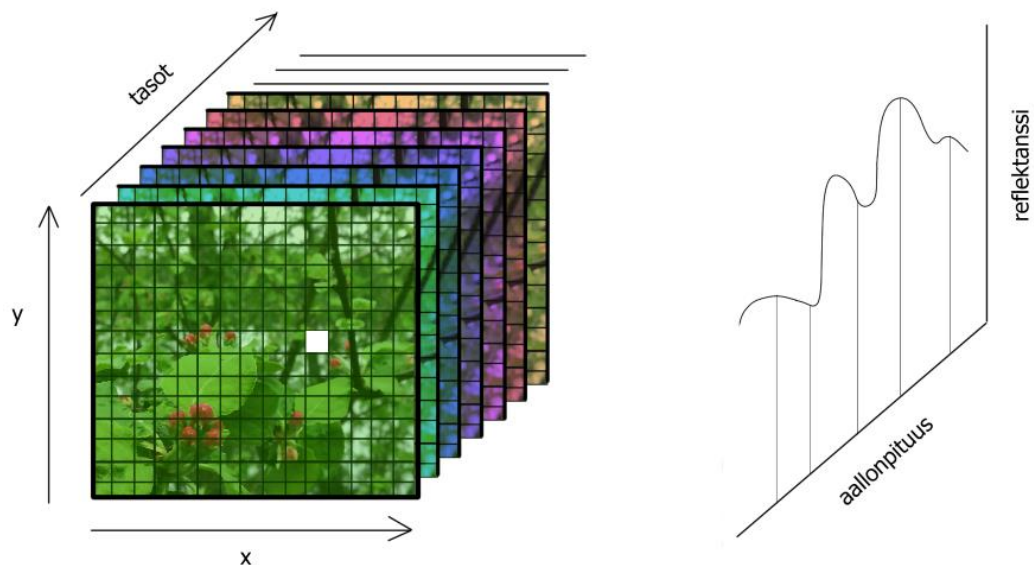
Maastosignaalien tarvittava määrä pienenee käytettäessä RTK- tai PPK-tekniikoita kerätyn aineiston sijaintitiedon tuottamiseen. Tällöin fotogrammetriaohjelmistolla tuotetun pistepilven, ortokuvan tai korkeusmallin georeferointiin riittää muutaman maastosignaalin käyttö, mikä sitoo tuotetun aineiston haluttuun koordinaatistoon.

### 3.5 Multi- ja hyperspektrikuvaus

Multi- ja hyperspektrikuvauksessa eli monikaistakuvauksessa sensori mittaa säteilyä usealla eri sähkömagneettisen spektrin aallonpituusalueella eli kaistalla. Multispektrisensorit havainnoivat muutamia suhteellisen leveitä kaistoja, kun taas hyperspektrisensorit mittaavat jopa satoja tarkkaan rajattuja kapeita kaistoja. Eri kohteet lähettävät eli emittoivat,

heijastavat sekä absorboivat säteilyä eri tavoin ja eri aallonpituuskaistoilla. Sensorilla havaitusta säteilyn intensiteetistä ja aallonpituudesta saadaan tietoa kohteen ominaisuuksista, ja myös kohteiden tunnistaminen on mahdollista sen heijastusominaisuuksien perusteella. Multi- ja hyperspektrikameroita käytetään esimerkiksi kasvillisuuden kartoituksessa, sillä kasvit voidaan erottaa muusta maastosta niiden heijastusominaisuuksien avulla.

Hyperspektrisensori ottaa kuvan jokaisella sen mittaamalla kaistalla. Tuotetut kuvat voidaan kasata päällekkäin tasoina, jolloin saadaan niin kutsuttu datakuutio, jossa kuution kolmannella dimensiolla kuvataan eri aallonpituuskaistoista otetuista kuvista koostuvia tasoja (kuva 11). Hyperspektriaineiston spektraalinen resoluutio tarkoittaa näiden tasojen määrää. Mitä enemmän kaistoja hyperspektrisensori havaitsee, sitä tarkemmin kohteen heijastaman tai lähettämän säteilyn spektri voidaan määrittää. Yleensä kaistoja on hyperspektrikuvauksessa niin paljon, että jokaiselle datakuution pikselille voidaan muodostaa säteilyspektri mitatulla aallonpituusalueella. Kuvassa 6 on esimerkkinä esitetty yhdelle pikselille muodostuva spektri reflektanssin eli kuvatun kohteen heijastuskyvyn (heijastuneen säteilyn intensiteetin) funktiona eri aallonpituusalueilla. Funktio ei ole jatkuva, sillä sensori ei mittaa jatkuvaa leveää kaistaa vaan kapeita kaistoja vierekkäin. (Jones & Vaughan 2010, s.103)



Kuva 11 Hyperspektrikuvauksen datakuution havainnollistaminen (mukaillen Jones & Vaughan 2010)



Hyperspektriaineiston tiedostokoko onkin tasojen määrän takia suuri ja aineiston käsittely ja analysointi vaatii paljon aikaa ja muita resursseja. Aineiston käsittelyn yksinkertaistamiseksi aineistosta voidaan eristää vain tietyiltä relevanttia informaatiota sisältäville kaistoilta kerätty data. Hyperspektrisensorit voidaan myös kalibroida mittaamaan vain tiettyjä aallonpituusalueita, jotka ovat mukana tutkittavan kohteen tarkastelussa. Näitä oleellista informaatiota sisältäviä kaistoja voidaan käyttää erilaisten spektri-indeksien (spectral indices) laskemiseksi. Indeksien käyttö helpottaa hyperspektriaineiston käsittelyä ja tulkitsemista, ja niitä käytetään esimerkiksi kasvillisuuden kartoituksessa ja maankosteuden spatiaalisen variaation havainnollistamisessa. Spektri-indeksit generoidaan kahden tai useamman kaistan matemaattisesta yhdistämisestä. Jokaiselle aineiston pikselille voidaan määrittää indeksin arvo, jolloin voidaan luoda uusia karttaesityksiä esimerkiksi kasvillisuuden määrästä kartoitetulla alueella. (Jones & Vaughan 2010, s.145, s.164)

Kaukokartoitussovelluksissa ehkä eniten käytetty spektraalinen indeksi on NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) eli normalisoitu kasvillisuusindeksi, joka ilmoittaa vihreän kasvillisuuden määrän kuvatulla alueella. NDVI muodostetaan vertaamalla mitatun lähi-infrapunasäteilyn (NIR) ja punaisen valon (RED) määrää yhtälön (3) mukaisesti. Kasvien pinnan heijastavuudessa on havaittavissa nopea muutos noin 700 nanometrin aallonpituusalueella (red-edge), joka tunnistetaan heijastuneen lähi-infrapunasäteilyn ja punaisen valon ( $\lambda=620-750$  nm) erossa. NDVI:n arvo kertoo siis kuvatun kasvillisuuden määrästä. (Jones & Vaughan, s. 166)

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (3)$$

Samankaltaisilla matemaattisilla muunnoksilla hyperspektriaineistosta voidaan luoda kuvattujen pintojen erilaisia ominaisuuksia kuvaavia indeksejä hyödyntämällä eri aallonpituusalueilla havaittuja säteilyn intensiteettejä. Hyperspektrisensoreilla kerätty aineisto käsitellään siihen soveltuvalla ohjelmistolla käyttötarkoitusta varten kuten kuvatun pinnan reflektanssin selvittämiseksi. Hyperspektraalisen raakadatan käsittelyyn kuuluu muun muassa pimeän virran vähentäminen tai poistaminen, flat field -korjaukset datan sisältämän kohinan poistamiseksi, aineiston väriaberraation korjaus sekä niin kutsutun spektraalisen hymyn (spectral smile) korjaus. (Hakala et al. 2018)

### 3.6 Lämpökuvaus

Niin elävät kuin elottomatkin kohteet lähettävät lämpösäteilyä. Lämpösäteily on ihmis-silmälle näkymätöntä infrapunasäteilyä, joka voidaan havaita infrapunakameralla eli lämpökameralla. Korkeissa lämpötiloissa lämpösäteily on myös näkyvää valoa, kuten tulenliekeissä. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, ja sen muodostaa aineessa olevien varattujen hiukkasten lämpöliike. Infrapuna- ja lämpökameroita käytetään kappaleiden pintalämpötilojen etämittauksessa teollisuuden sovelluksissa, rakenteiden kunnon tarkastelussa sekä ympäristön havainnoinnissa.

Lämpökamera on passiivinen sensori, joka vastaanottaa kohteen emittoimaa ja heijastamaa lämpösäteilyä ja mittaa kohteen lämpötilan sen pinnalla. Mitä korkeampi kohteen lämpötila on, sitä enemmän se emittoi infrapunasäteilyä. Lämpökamera konvertoi sen mittaaman lämpösäteilyn intensiteetin digitaaliseen muotoon, ja ilmaisimelle muodostetaan lämpökuva. Lämpökameraset ovat erilaisilla aallonpituusalueilla, joten lämpökamera ja sen mittaustila tulee valita käyttökohteeseen sopivaksi. Esimerkiksi teollisuudessa käytettävät lämpökameraset mittaavat usein laajaa lämpötilajakaumaa. Ympäristön havainnoinnissa tarkasteltu lämpötilajakauma on pienempi, mutta pienetkin muutokset lämpötilassa on tärkeää havaita ja rekisteröidä. Lämpökameroiden radiometrinen resoluutio määrittelee kuinka pieniä lämpötilaeroja ne pystyvät rekisteröimään.

Lämpökameroilla tuotettavat reaaliaikaiset lämpökuvat sisältävät usein kohinaa, ja kuvanlaatua pyritään parantamaan kuvankäsittelymenetelmien avulla. Lämpökuvien riittävä laatu on tärkeää etenkin rakenteiden kunnon tarkkailussa, sillä lämpökuvasta pyritään paikantamaan rakenteellisia epäkohtia. Lämpökuvien prosessoinnin tavoitteena voi olla esimerkiksi kontrastin lisääminen, jolloin yksityiskohdat voivat erottua paremmin. (Jones & Vaughan, s.22, s.93; Bagavathiappan et al. 2013)

### 3.7 LiDAR eli laserkeilaus

LiDAR (Light Detection and Ranging) eli laserkeilaus on kartoitus- ja maastomittausmenetelmä, jolla on mahdollista tuottaa tarkkoja 3D-pistepilviä maastonmuodoista, kasvillisuudesta sekä erilaisista rakenteista kuten silloista ja padoista. Laserkeilainten käyttö dronien avulla on yleistynyt viime vuosina RPAS-kaukokartoitukseen soveltuvien LiDAR-järjestelmien kehittyessä, mutta laserkeilaus on kustannuksiltaan edelleen varsin

kallis menetelmä. Se voidaan useissa kaukokartoitustehtävissä korvata edullisemmilla fotogrammetrisilla menetelmillä.

Laserkeilain on aktiivinen sensori, joka tutkan tavoin skannaa kartoitettavaa kohdetta laserpulsseilla. Keilain lähettää lyhyitä laserpulsseja ja mittaa kohteesta heijastuvan pulssin. Sensorin lähettämät laserpulssit ovat koherenttia valoa, jonka aallonpituuskaista on hyvin kapea. Useimmat nykyisin kaukokartoituksessa käytetyt laserkeilaimet käyttävät näkyvää vihreää valoa ( $\lambda=532$  nm) tai infrapunasäteilyä ( $\lambda=1024$  nm tai  $\lambda=1550$  nm). Laite rekisteröi pulssin lähtöhetken ja heijastuneen pulssin havaintohetken, joiden erotuksena saadusta pulssin kulkeutumiseen kuluneesta ajasta lasketaan sensorin ja kohteen välimatka tiedettäessä pulssin nopeus väliaineessa (ilmassa). RPAS-laitteen hyötykuormana oleva LiDAR skannaa sen alapuolista aluetta, ja kartoitettava alue määrittyy droonin lentoreitin mukaisesti. Laserkeilaimen mittaaman etäisyystiedon yhdistäminen tarkalla GNSS-paikantimella ja IMU-sensorilla mitattuun keilaimen kolmiulotteiseen sijainti- ja asentotietoon mahdollistaa georeferoitujen 3D-pistepilvien tuottamisen ja maanpinnan korkeuserojen mallintamisen. (Jones & Vaughan 2010, s.113; Mandlbürger et al. 2019)

Kartoitettavan kohteen pinta määrittää kohteesta heijastuvien pulssien intensiteetin, jonka laserkeilain mittaa. LiDAR:in käyttämät laserpulssit läpäisevät kasvillisuutta, joten maastonmuodot myös kasvillisuuden alta ovat laserkeilattavissa ja mallinnettavissa toisin kuin fotogrammetriassa. Korkean resoluution RPAS-laserkeilauksessa droonin lentoreitti suunnitellaan niin, että laserkeilain skannaa samoja maastokohteita tai rakenteita useaan kertaan eri perspektiiveistä. Tällöin maaston tai rakenteen muoto saadaan mallinnettua kolmiulotteisesti kaikista suunnista. Laserkeilaimen tuottamissa pistepilvissä 3D-sijaintitiedon sisältäviä pisteitä voi olla satoja yhdellä neliömetrillä. Pistetiheys eli laserkeilauksen spatiaalinen resoluutio riippuu lentokorkeudesta sekä käytetyn laserkeilaimen ominaisuuksista kuten laserpulssin jalanjäljestä (footprint). Pistetiheyteen vaikuttavat myös muun muassa ilma-aluksen lentonopeus, sensorin havainnoiman alueen leveys ja laserpulssien frekvenssi. (Jones & Vaughan 2010, s.114; Deems et al. 2013)

Laserkeilauksella tuotetuista 3D-pistepilvistä voidaan laserkeilaisaineistojen käsittelyyn soveltuvalla ohjelmistoilla tuottaa helpommin tulkittavia korkeusmalleja. Digitaalinen korkeusmalli eli DEM (Digital Elevation Model) koostuu maanpinnan muotoja kuvaa-



vasta korkeuspisteiden joukosta sekä korkeuspisteiden välien interpolaatiosta. DEM esitetään yleensä rasterina. Digitaalinen maastomalli eli DTM (Digital Terrain Model) kuvaa maanpintaa ja sisältää tiedon esimerkiksi rinteiden kaltevuuksista ja viettosuunnista. Digitaalinen pintamalli eli DSM (Digital Surface Model) kuvaa maanpinnan lisäksi myös kasvipeitettä ja sen korkeus noudattaa esimerkiksi rakennusten kattoja ja metsän latvustoa. Maasto- ja korkeusmalleista voidaan tuottaa graafisia esityksiä kuten korkeuskäyriä käyttötarpeen mukaan. (KMTK 2016)

### 3.8 Muut menetelmät

RPAS-laitteiden hyötykuormana käytetään useimmissa ympäristön mittaus- ja kartoitus-tehtävissä järjestelmäkameroita, multi- ja hyperspektrikameroita, lämpökameroita sekä laserkeilaimia. Näiden sensorien on myös drooneihin asennettuna todettu tuottavan luotettavaa aineistoa ympäristön tutkimuksen käyttötarpeita varten. Kaukokartoitusinstrumentteja käyttävillä RPAS-menetelmillä voidaan tuottaa aineistoa useiden eri tekniikan ja tutkimuksen osa-alueiden tarpeisiin. Valokuvausta, monikaistakuvausta, lämpökuvausta ja laserkeilausta tullaan hyödyntämään myös tulevaisuudessa, mutta uusia RPAS-yhteensopivia menetelmiä kehitetään jatkuvasti. RPAS-laitteiden ja mittaustekniikoiden kehittyessä ilmennee uusia mahdollisuuksia, joita ei tätä selvitystä tehdessä vuonna 2020 ollut laajemmin vielä tutkittu.

Drooniin voidaan kuitenkin asentaa perinteisten kaukokartoitusinstrumenttien tavoin mikä tahansa sensori tai mittalaite droonin koon ja sen suurimman lentoonlähtömassan puitteissa. Sähkömagneettisen säteilyn lisäksi drooniin asennettavat etämittaussensorit voivat hyödyntää esimerkiksi ääniaaltoja. Ultraääntä ja kaikuluotausta hyödyntävien mitalaitteiden käytön mahdollisuutta on tutkittu paljon vesistöjen havainnoinnissa

#### 3.8.1 Kaikuluotaus

Kaikuluotaus (sonar, sound navigation and ranging) on vedenalaisessa kartoituksessa ja etäisyysmittauksessa käytetty ääniaaltoja hyödyntävä tekniikka. Se on laserkeilauksen tapaan aktiivinen mittausmenetelmä, jossa kaikuluotain lähettää ääniaallon ja mittaa kohteen pinnalta heijastuneen ääniaallon eli kaiun (echo). Välimatka on laskettavissa ääniaallon kulkeutumiseen kuluneen ajan perusteella, kun tunnetaan äänennopeus väliaineessa. Myös passiivisia kaikuluotaimia eli ääniaaltoja mittaavia sensoreita käytetään vesiympäristöjen tutkimuksessa. Ultraääntä eli korkeataajuisia ääntä hyödyntäviä aktiivisia

kaikuluotaimia käytetään myös RPAS-laitteiden esteentunnistusjärjestelmissä. Ne ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia, energiatehokkaita sekä kooltaan pieniä ja kevyitä, joten ne soveltuvat kuluttajatason RPAS-laitteiden kustannus- ja kokovaatimuksiin. Niitä voidaan myös käyttää multikopterien lentoonlähdön ja laskeutumisen aikaisen lentokorkeuden mittaamisessa. Kaikuluotaukseen perustuvasta lentokorkeuden määrittelystä voi olla hyötyä esimerkiksi kaupunkiympäristössä, jossa korkeat rakennukset heikentävät GNSS-paikannussignaaleja. Kaikuluotaimien käyttöä ilmassa rajoittaa niiden lyhyt kantana sekä ilman vaihteleva lämpötila ja suhteellinen kosteus, joka aiheuttaa systemaattisia virheitä etäisyysmittauksiin. (Papa et al. 2016)

Vedessä käytettäviä kaikuluotaimia hyödynnetään batymetriassa eli meren tai pintavesimuodostumien syvyyden mittaamisessa ja pohjan kartoituksessa. Kaikuluotaimia käytetään yleensä veneisiin asennettuna, mikä rajoittaa pienten uomien pohjan kartoitusta niiden avulla. Kaikuluotaimia voidaan käyttää myös pienien kauko-ohjattaviin veneisiin asennettuna. Myös RPAS-laite voi vetää veden pinnalla kelluvaa kaikuluotainta. (Bandini et al. 2018)

Ultraääntä hyödynnetään nesteiden virtaaman mittauksessa erilaisissa teollisuuden prosesseissa. Ultraäänivirtausmittari kiinnitetään yleensä prosessiputkeen, jonka sisällä kulkevan nesteen virtausnopeus voidaan mitata. Ultraäänisignaaleja ja niiden kaiun mittaamista hyödyntävien sensoreiden käyttö RPAS-laitteeseen asennettuna olisi kiinnostava menetelmä, jota ei kuitenkaan vielä ole tutkittu laajemmin. Ääniaaltoja hyödyntävien sensorien käyttö ilmassa on ongelmallista ympäristöstä aiheutuvan kohinan sekä alustan liikkeen ja värinän takia. Myös multikoptereiden roottoreiden ääni voi häiritä mittausta.

### 3.8.2 Tutkat

Tutka (radar, Radio Detection And Ranging) on aktiivinen sensori, joka lähettää radio- tai mikroaaltoja ja tutkan antenni rekisteröi mitattavan kohteen pinnalta heijastuvan kaiun. Tutkalaitteita käytetään etäisyyksien mittauksessa useissa eri sovelluksissa kuten ilmailussa havaitsemaan muita ilma-aluksia ja säärintamia, merenkulussa havaitsemaan vedenpinnan yläpuoliset kohteet sekä muun muassa liikenteen valvonnassa. Ympäristön lähettämää mikroaaltosäteilyä voidaan havainnoida myös passiivisilla sensoreilla. (Jones & Vaughan 2010, s.107-113)

Kuvantavilla tutkilla (imaging radar) voidaan laserkeilauksen tapaan saada tietoa kartoitettavien kohteiden muodosta ja korkeusvaihteluista. Tutkien käyttöä kuitenkin rajoittaa niiden pieni spatiaalinen resoluutio, joka aiheutuu mikroaaltojen sirottumisesta ilmakehässä (Jones & Vaughan 2010, s.109). Synteettisen apertuurin tutka eli SAR-tutka (Synthetic Aperture Radar) käyttää Doppler-ilmiötä ja tutkan liikettä suuremman antennin syntetisointiin hankitun aineiston spatiaalisen resoluution parantamiseksi. Synteettistä apertuuria hyödyntäviä tutkalaitteita voidaan käyttää kuluttajatasoisen droniin asennettuna esimerkiksi maaston korkeuserojen havainnoinnissa (Li & Ling 2015).

Doppler-ilmiötä hyödynnetään myös uomassa virtaavan veden virtausnopeutta mittaavissa tutkalaitteissa, joita kutsutaan myös dopplertutkiksi. Tutkan lähettämän säteilyn taajuuden tai vaiheen dopplersiirtymä aiheutuu säteilyä heijastavan kohteen liikkeestä kohti tutkan vastaanotinta tai siitä poispäin. Havaitun dopplersiirtymän avulla voidaan laskea kohteen nopeus. Joen tai muun virtaveden virtausnopeutta mittaava dopplertutka voidaan kiinnittää esimerkiksi sillan rakenteisiin. Tutkan on osoitettava viistosti alaspäin kohti veden pintaa ja se on asennettava kohtisuoraan veden virtaussuuntaan nähden, jotta dopplersiirtymästä voidaan laskea veden virtausnopeus. Dopplertutkalla mitattu nopeus on veden virtausnopeus vain tutkan havainnoimalla kohdalla uomassa ja vain veden pinnassa. Veden pinnasta mitattu virtausnopeus on kuitenkin suurempi kuin virtausnopeus lähempänä uoman pohjaa ja sen reunoja, joten dopplertutkan mittaustulokset vaativat korjauksia uoman keskimääräisen virtausnopeuden tuottamiseksi. Esimerkiksi OTT HydroMetin kehittämä SVR 100 -dopplertutka on asennettava kiinteään ja liikkumattomaan alustaan, jotta alustan liikkeestä ei aiheudu mittausrvirheitä ja kohinaa. Tutkalaite on myös kalibroitava niin, että se ei mittaa veden pinnalla havaittavaa tuulesta aiheutuvaa ylävirtaan kulkevaa aaltoliikettä. Vain laminaarisen virtauksen nopeuden mittaaminen onnistuu, sillä tutka ei pysty mittaamaan turbulenttisen virran pyörteistä eri suuntiin heijastuvaa säteilyä. Tällaisen dopplertutkan käyttäminen droniin asennettuna on ongelmallista, sillä multi-kopterin leijuminen täysin paikallaan on haastavaa toteuttaa tuuliolosuhteiden sekä ohjaus- ja paikannusjärjestelmien epätarkkuuden takia. (OTT HydroMet 2019)

### **3.8.3 Vesinäytteenotto ja vedenlaatuanturit**

RPAS-laitteita voidaan käyttää kaukokartoitusmenetelmien lisäksi hyödyksi sellaisissa tutkimusmenetelmissä, joissa tarvitaan kontakti tutkittavaan kohteeseen. Drooneja voi-

daan kustomoida käyttötärpeen mukaan ja niihin voidaan asentaa esimerkiksi vesinäytteenotin tai erilaisia veteen upotettavia antureita, joilla mitataan muun muassa veden lämpötilaa tai sähköjohtavuutta.

Droonien kustomoinnissa on huomioitava niiden hyötykuorman rajallinen koko ja paino. Droonin lentopainon kasvaessa sen lentoaika lyhenee. Suuret multikoptereiden rakenteen alle asennettavat lisälaitteet ja sensorit voivat vaikeuttaa droonin lentoonlähtöä ja laskeutumista, jos ne estävät droonin pysymisen maassa vaakatasossa. Jos multikopteri laskeetaan lennosta maahan suoraan alaspäin, sensorit voivat vaurioitua epätasaisessa laskeutumismaastossa. Multikoptereihin voidaan asentaa kooltaan suuremmat laskutelineet tällaisten ongelmien välttämiseksi.

Vesinäytteiden noutamiseen käytetään yleensä Limnos-tyyppistä noudinta. Se on läpinäkyvä lieriö, jonka molemmat päädyt avataan noutimen ollessa vedessä. Lieriön tilavuus täyttyy vedellä ja lieriö suljetaan. Mekanismit on yksinkertainen automatisoida. Vesinäytteiden otossa on tärkeää välttää näytteen kontaminoitumista. Näytteenoton automatisointi vähentää kontaminaation riskiä. Droonilla voidaan helposti hakea vesinäyte sellaisesta paikasta, johon ihmisen olisi vaikeaa tai vaarallista mennä.

Vedenlaadun mittausanturit voivat painaa vain pari sataa grammaa (Suomen ympäristökeskus 2019b), joten niitä voidaan hyödyntää kantokyvyltään pienienkin droonien kuljetamana. Anturi voidaan kiinnittää vaijerin päähän ja vaijeria voidaan liikuttaa drooniin asennettavalla kauko-ohjattavalla vinssijärjestelmällä. Kun anturi lasketaan veteen, multikopterin on pysyttävä paikallaan, jotta anturin syvyys saadaan laskettua vaijerin pituuden ja droonin lentokorkeuden (etäisyyden vedenpinnasta) erotuksena.

## 4 RPAS-LAITTEIDEN HYÖDYNTÄMINEN VESIVARATEHTÄVISSÄ

Kaukokartoitusta hyödynnetään monin eri keinoin vesivarojen tutkimuksessa ja niiden käytön suunnittelussa. Kaukokartoitusmenetelmien avulla voidaan selvittää esimerkiksi vesistön pinta-ala ja tutkia vesistön ja sen ranta-alueiden ominaisuuksia. Droonien avulla tuotettuja ilmapalokuvia käytetään Suomessa tänä päivänä useissa vesivarattehtävissä kuten tulvatilanteiden seurannassa, mutta muun drooneilla hankitun kaukokartoitusaineiston käyttäminen on harvinaisempaa.

Useissa tieteellisissä julkaisuissa käsiteltyjä RPAS-laitteita hyödyntäviä tekniikoita ympäristön kartoituksessa ja seurannassa (environmental monitoring) ovat valokuvaus, multi- ja hyperspektraalinen kuvaus, lämpökuvaus sekä laserkeilaus (LiDAR). Erityistä huomiota tässä selvityksessä on kiinnitetty fotogrammetristen menetelmien hyödyntämiseen, koska niiden käytännön toteutus ei vaadi lisälaitteiden hankintaa, vaan aineisto voidaan kerätä droonin perusvarustukseen kuuluvalla kameralla. Monissa kuluttajataso- drooneissa kamera onkin integroituna droonin rakenteeseen. Tässä selvityksessä keskityttiin näiden yleisten RPAS-tekniikoiden soveltamiseen vesivarojen käyttöön ja hoitoon liittyvissä tehtävissä. Tarkastelun näkökulmana oli menetelmien käytännön hyöty ja soveltuvuus RPAS-toimintaan. Toisaalta on tarkasteltu, mitkä tekniikat vaativat vielä lisätutkimusta niiden luotettavuuden varmistamiseksi ja hyvien käytäntöjen selvittämiseksi.

RPAS-laitteiden käyttöä vesivarattehtävissä koskevien tutkimustulosten keruu on suoritettu kartoittavana ja kriittisenä kirjallisuuskatsauksena. Valtaosa esitellyistä tutkimuksista on tieteellisten aikakauslehtien julkaisuja. Kirjallisuuskatsaus tehtiin aikavälillä lokakuu 2019 – helmikuu 2020. Kirjallisuuskatsauksessa suositettiin mahdollisimman uusia, alle viisi vuotta sitten julkaistuja tieteellisiä artikkeleita, jotta pystyttiin saamaan kokonaiskuva viimeisimmistä state-of-the-art -tekniikoista RPAS-toiminnassa.

Vesivarattehtävien määritelmänä on tässä selvityksessä käytetty Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen vesistöyksikön työtehtäviä, joihin kuuluu muun muassa vesistöjen käytöstä, hoidosta ja kunnostuksesta vastaaminen, tulvariskien hallinta sekä peruskuivatuksen edistäminen. Vesistöyksikkö vastaa valtion vesitaloudellisista luvista sekä niihin liittyvästä säännöstelystä, patoturvallisuudesta, vesistörakenteiden ylläpidosta sekä muista lupavelvoitteista. Yksiköllä on myös valtakunnallinen vastuu esimerkiksi hydrologisen tiedon

tuottamisesta. Tässä selvityksessä on myös käsitelty RPAS-laitteiden avulla tehtävää vedenlaadun havainnointia ja mittaamista, joka tuli kartoittavaa kirjallisuuskatsausta tehtäessä useasti vastaan RPAS-laitteita hyödyntävänä menetelmänä. Selvityksessä ei voitu diplomityön rajallisesta laajuudesta johtuen käsitellä kaikkia mahdollisia droonien käyttökohteita vesistöyksikön tehtävissä.

#### **4.1 Vesistörakenteiden tarkkailu**

Vesistörakenteita ovat muun muassa vesistöjen säännöstelyyn kuuluvat rakenteet eli säännöstelypadot, pohjapadot sekä säännöstelyaltaat ja maapadot. Suomessa valtion kunnossapidettäviin vesirakenteisiin kuuluu myös penkereitä ja kanavia. Rakenteiden kunnon ylläpitäminen on tulvatorjunnan toimimisen kannalta tärkeää.

Vesistörakenteiden kuntoa tarkkaillaan visuaalisesti sekä maastomittausten avulla. Maastomittauksilla seurataan esimerkiksi maapatojen mahdollisia muodonmuutoksia kuten painaumia. Muodonmuutokset voivat aiheutua maapadon rakenteellisista muutoksista esimerkiksi padon sisäisen eroosion takia. Vesistörakenteilla voi olla lakisääteinen tarkkailuvelvoite. Esimerkiksi patorakenteita ja niiden kuntoa seurataan säännöllisin väliajoin tehtävillä tarkastuskäynneillä sekä mittauksilla. Patoturvallisuuslaissa (494/2009) on määrätty vähintään kerran vuodessa tehtävistä vuositarkastuksista ja vähintään viiden vuoden välein määräaikaistarkastuksista.

Maastomittauksissa käytetään esimerkiksi vaaituskoneita kuten takymetrejä ja GNSS-satelliittipaikannusta hyödyntäviä laitteita. RTK-tekniikkaa hyödyntävällä GNSS-paikantimella mitatut xyz-koordinaatit voidaan jalostaa digitaalisiksi korkeusmalleiksi, joiden erotuskykyä kuitenkin rajoittaa maastomittauspisteiden tiheys. Eri ajankohtina tuotettuja maasto- ja korkeusmalleja vertailemalla rakenteiden muutokset ovat helposti havaittavissa. RTK-GNSS-paikantimella manuaalisesti tehtävät maapatojen harjojen mittaukset ovat kuitenkin aikaa vieviä. RPAS-laitteiden käyttö vesistörakenteiden tarkkailussa nopeuttaa maastossa tehtäviä mittauksia sekä mahdollistaa laajan näkökulman sekä vesistöjen että vesistörakenteiden visuaaliseen tarkasteluun. Droonilla suoritettavan valokuvaamisen avulla voidaan kartoittaa laajoja alueita nopeasti, ja valokuvista tuotetuista ortokuvista voidaan helposti tulkita laajoja kokonaisuuksia. RPAS-laitteita voidaan käyttää myös vesistörakenteiden digitaalisten korkeusmallien luomisessa.

Betonirakenteiden kuntoa voidaan tarkkailla myös lämpökameroilla. Omar & Nehdi (2017) ovat tutkimuksessaan käyttäneet nelikopteriin asennettua lämpökameraa betonisiltojen kaukokartoituksessa. Lämpökuvauksessa saatiin paikannettua sillan rakenteellisia vikoja, jotka varmistettiin käyttämällä rakenteiden luotausta (sounding) sekä HCP-testejä (Half-Cell Potential). Omar & Nehdi toteavat kaukokartoitusmenetelmien olevan hyödyllisiä infrastruktuurin tutkimuksessa; etämittauksena tehtävä siltojen kuvaaminen lämpökameralla ei häiritse tai estä liikenteen kulkua sillalla. RPAS-laitteiden käyttäminen siltojen kunnan tarkkailussa myös lisää työturvallisuutta. Tutkimuksessa esitetyt menetelmät ovat sovellettavissa muidenkin betonirakenteiden kuten patojen betonirakenteiden lämpökuvauksessa.

Vesistörakenteiden kuten patojen ja tulvapengerten digitaalisten 3D-mallien tuottamiseen käytetään yleensä laserkeilausta tai fotogrammetriaa. Molemmilla menetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Niitä voidaan myös käyttää yhdessä, jolloin molempien menetelmien hyödyt korostuvat. Mitä menetelmää käytetäänkin, tärkeää on mittauksen toistettavuus ja tuotetun aineiston vertailtavuus. Tuotetut digitaaliset 3D-mallit on georeferoitava, jotta niitä voidaan vertailla keskenään muutosten havaitsemiseksi. Myös vertailtavien aineistojen tarkkuus on oltava samaa luokkaa. Digitaalisista pistepilvistä ja 3D-malleista voidaan tuottaa tarpeen mukaan erilaisia korkeus- ja maastomalleja.

Fotogrammetrian käyttöä 3D- ja korkeusmallien tuottamisessa rajoittaa kartoitettavan alueen kasvipeitteisyys ja talvisin myös lumipeitteisyys. Laserkeilaus pystyy kartoittamaan maanpinnan muodot myös kasvipeitteen läpi, mutta valokuvista ei voida havaita maanpintaa tiheän kasvillisuuden alta. Tämä haittaa esimerkiksi maapatojen kasvipeitteisten luiskien mallintamista fotogrammetrialla. Lumipeitteisyys niin ikään on ongelmallista fotogrammetrian kannalta, sillä lumipeite voi näyttää valokuvissa hyvin monotoniselta. Yksityiskohtia ja kontrastieroja, joita fotogrammetriaohjelmisto tarvitsee 3D-mallin rekonstruktiota varten, ei juuri ole lumipeitteessä havaittavissa. Valokuvien avulla tuotetuissa mallinnuksissa kuitenkin säilyvät mallinnettavan kohteen värit, mistä on voi olla hyötyä rakenteiden visuaalisessa tarkastelussa.

Fotogrammetriset menetelmät ja laserkeilaus pääsevät tarkkuudeltaan samantasoiisiin mittaustarkkuuksiin olosuhteiden ollessa valokuvauksen kannalta otolliset. Valokuvien laatua voi heikentää esimerkiksi sääolosuhteet kuten vesisade tai ympäristön riittämätön

valoisuus. Laserkeilaus onnistuu myös hämärän aikaan, koska laserkeilain ei tarvitse toimiakseen auringonvaloa.

Laserkeilauksen ja fotogrammetristen menetelmien käyttöä vesistörakenteiden mallinnuksessa ovat tutkineet muun muassa Bakula et al. (2016) sekä Salach et al. (2018) teellisissä julkaisuissaan. Bakula et al. (2016) ovat tutkimuksessaan käsitellyt RPAS-laserkeilauksen hyödyntämistä tulvapenkereiden kunnon arvioinnissa ja tarkkailussa. Tutkimuksessa luotiin korkeusmalli Varsovassa sijaitsevan joen rannoilla olevista tulvapenkereistä. Tutkimuksessa käytettyyn Hawk Moth -nelikopteriin asennettiin 2,2 kilogrammaa painava YellowScan Mapper -laserkeilain sekä 16 millimetrin aukon Sony α6000 -digitaalikamera, joita käytettiin samanaikaisesti RPAS-laitteen kartoittaessa tutkittua pengertä. Digitaalikameran ottamista valokuvista luotua ortokuvaa käytettiin laserkeilausaineiston avulla tuotetun digitaalisen korkeusmallin värittämiseen. Tavoitteena tutkimuksessa oli saavuttaa penkereen korkeusmallille 10 senttimetrin mittaustarkkuus, joka vaaditaan useissa Euroopan maissa tehtävissä tulvasuojelun rakenteiden mittauksissa.

Tulvapenkereen laserkeilaamiseen käytettiin kahta eri tapaa. Ensimmäisessä tavassa RPAS-laite lensi penkereen päällä sen suuntaisesti sellaisella lentokorkeudella, että käytettyjen sensoreiden jalanjälki (footprint) kattoi koko penkereen leveyden. Toisin sanoen pengeri kuvattiin vain yhden kerran. Toisessa tavassa RPAS-laite kuvasi penkereen sen molemmilta puolilta eli lensi penkereen suuntaisesti kaksi kertaa. Lentolinjat kulkivat penkereen suuntaisesti mutta olivat hieman sivussa penkereen harjan linjasta. Kahden lentolinjan limittäisyys oli 75 %. Lentonopeus määritettiin niin, että digitaalikamera pysyi ottamaan kuvia sellaisella tiheydellä, että kuvien limittäisyys lentosuunnassa oli vähintään 60 %. Saatuja tuloksia verrattiin GNSS-RTK-paikantimella tehtyjen maastomittausten kanssa. Yhden mittaustuloksen tapauksessa tutkittujen pisteiden korkeuserojen keskiarvo oli -1,4 cm ja keskihajonta 8,6 cm ja kahden yhdensuuntaisen mittaustuloksen tapauksessa korkeuseron keskiarvo oli -2,1 cm ja keskihajonta 7,2 cm. Molemmissa tapauksissa saavutettiin 10 senttimetrin mittaustarkkuus.

Bakula et al. toteavat tutkimuksensa johtopäätöksenä RPAS-laitteella tehdyn laserkeilauksen soveltuvan hyvin tulvapengerten korkeusmallien tuottamiseen. Tulvapenkereiden tarkkailussa laserkeilausta suositellaan fotogrammetristen menetelmien sijasta, sillä penkereiden kasvipeite voi häiritä vesistörakenteiden geometrian mallintamista fotogrammetrian avulla.



Salach et al. (2018) on vertaillut laserkeilaimella sekä fotogrammetrisilla menetelmillä tuotettuja digitaalisia maastomalleja (DTM). Maastomalli tuotettiin joen penkereistä ja niitä ympäröivistä peltoalueista. Kartoitukseen käytettiin Hawk Moth -nelikopteria, ja lentoja tehtiin tutkitulla alueella yhteensä kahdeksan. Tutkimusalueen maankäyttö oli vaihtelevaa ja alueella oli korkeudeltaan vaihtelevaa luonnonkasvillisuutta, viljeltyjä kasveja, teitä ja puustoa. Tutkimuksessa käytetyn 1,6 kiloa painavan YellowScan Surveyor -laserkeilaimen resoluutio oli 180 pistettä neliömetrillä ja käytetyn Sony  $\alpha$ 6000 -kameran tuottamien valokuvien maastopikselin koko (GSD) oli 2 cm lentokorkeuden ollessa 50 metriä. Valokuvien georeferoimiseksi käytettiin kuvatululle alueelle levitettyjä maastosignaaleja (GCP). Laserkeilausaineistosta ja valokuvista tuotettuja DTM-malleja verrattiin GNSS-RTK-paikantimella yhteensä 193 pisteessä tehtyihin maastomittauksiin. Fotogrammetrisin menetelmin tuotetun maastomallin virhe kasvoi mitä korkeampaa kasvillisuus oli. Tarkkuus väheni 10 cm kasvillisuuden korkeuden kasvaessa 20 cm. Laserkeilauksella tuotettujen maastomallien todettiin olevan tarkkuudeltaan parempia verrattuna fotogrammetrian avulla tuotettuihin maastomalleihin.

Vesistörakenteiden lisäksi myös luonnonuomien rantatörmiiä sekä ideaalitapauksessa pohjan muotoa voidaan mallintaa fotogrammetrisia menetelmiä käyttämällä. Kirkasvetisissä vesistöissä myös vedenalainen kartoitus onnistuu fotogrammetristen menetelmien avulla. Pinnan yläpuolelta otettujen valokuvien avulla tehtävässä pohjan kartoituksessa on kuitenkin huomioita valon taittuminen ilman ja veden rajapinnalla, mikä vääristää valokuvissa havaittuja pohjan muotoja. Woodgetin et al. (2015) tieteellisessä julkaisussa on käsitelty jokiympäristöjen korkeusmallien luomista SfM-tekniikkaa käyttäen. Multikopterin kameran ottamat valokuvat prosessoitiin niin, että valon taittumisesta aiheutuva vääristymä korjattiin.

Myös Dietrich (2017) on kokeellisessa tutkimuksessaan käyttänyt SfM-tekniikkaa matalan uoman pohjan kartoituksessa. Tutkimuksessa on käytetty iteratiivista menetelmää, joka laskee valon taittumisesta aiheutuvalle virheelle korjaustermi jokaisessa SfM-tekniikalla tuotetun pistepilven pisteessä. Kuten useat muut fluviaalisia prosesseja tutkivat kaukokartoitusmenetelmät, myös tutkimuksessa esitetty menetelmän todetaan toimivan vain ideaalisissa olosuhteissa. Aaltojen vaikutus tekee valon taittumisesta veden rajapinnalla entistä haastavamman tulkita. NASA:n kehittämää kokeellista fluid lensing -algoritmiä (Chirayath & Earle 2016) on käytetty yhdessä SfM-tekniikan kanssa Amerikan Samoalla

sijaitsevien koralliriuttojen 3D-mallinnuksessa droonilla otetuista valokuvista. Fluid lensing -algoritmi huomioi valokuvien käsittelyssä ja vedenalaisten kohteiden rekonstruktiossa myös aaltojen vaikutuksen valon kulkeutumiseen vedessä ja ilmassa.

Fotogrammetristen lisäksi useita aktiivisia mittausmenetelmiä voidaan käyttää vedenalaisten rakenteiden ja pinnanmuotojen kartoitukseen. Bandini et al. (2018) on käyttänyt järven ja kahden joen vedenkorkeuden mittaamisessa ja pohjan kartoituksessa RPAS-laitteeseen vaijerilla kiinnitettyä kaikuluotainta. Droonilla liikutettiin veden pinnalla kelluvaa kaikuluotainta, jolla pystyttiin havaitsemaan vedenalaiset kohteet 35 metriin asti. Veden sameus ja pohjan materiaali aiheuttivat mittavirheitä 35 metrin jälkeen.

## **4.2 Hydrologisen seurannan tehtävät**

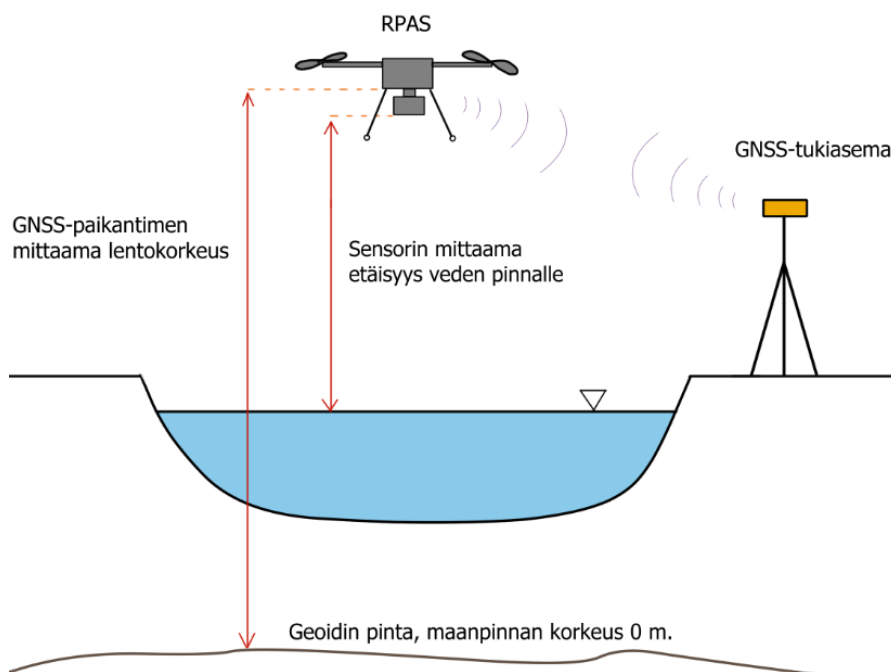
Hydrologiseen seurantaan kuuluu muun muassa sadannan, vesistöjen vedenkorkeuden, virtaaman, jäänpaksuuden ja pintaveden lämpötilan mittaukset sekä pohjaveden pinnan korkeuden, roudan syvyyden ja lumen vesiaron mittaukset (Suomen ympäristökeskus 2019a). RPAS-laitteita ja niiden erilaisia hyötykuormia voidaan hyödyntää vedenkorkeuden, virtaaman, lumipeitteen sekä veden lämpötilan mittauksessa. Pitkien aikasarjojen tuottaminen on hydrologisen seurannan kannalta tärkeää, joten täytyy tapauskohtaisesti arvioida, kelpaako RPAS-laitteilla tuotetut aineistot osaksi muiden havaintojen sarjoja.

### **4.2.1 Vedenkorkeuden mittaus**

Vesistöjen vedenkorkeuden ja virtaaman havainnoinnin kautta saadaan tietoa hydrologisesta kiertokulusta. Vedenkorkeustietoja käytetään muun muassa virtaamien laskennassa ja mallinnuksessa sekä vesistöjen säännöstelyssä. Vedenkorkeuksien ja virtaamien vaihtelun seuranta hyödynnetään myös ilmastomuutoksen vaikutusten arvioinnissa (Korhonen 2007, s.7). Virheellinen vedenkorkeustieto voi johtaa vesistömallien virheelliseen kalibrointiin tai vesistöjen virheelliseen säännöstelyyn, joten käytettyjen mittausmenetelmien riittävä tarkkuus on tärkeää. Jatkuvia vedenkorkeushavaintoja varten on useisiin vesistöihin rakennettu vedenkorkeusasemia, joista useiden toiminta on automatisoitua (Suomen ympäristökeskus 2019a, s.25). Vedenkorkeusasemia ja automatisoituja mittareita ei kuitenkaan ole kaikissa vesistöissä, ja manuaaliselle mittaukselle voi olla tarvetta. Manuaaliset vedenkorkeusmittaukset voidaan suorittaa käyttämällä GNSS-paikannuslaitteita sekä mittakeppiä. Myös useita RPAS-yhteensopivia menetelmiä voidaan käyttää vedenkorkeuden mittauksessa. Drooneja apuna käyttäessä vesikulkuneuvolle ei ole tarvetta,

mikä vähentää vedenkorkeusmittausten kustannuksia sekä antaa joustavuutta mittausten toteutukselle. Drooneja voidaan käyttää vaikeasti saavutettavissa olevissa syrjäisissä koh-teissa ja pilotointi voidaan suorittaa vesistön rannalta.

Bandini et al. (2017) on tutkinut miehittämättömien ilma-alusten soveltuvuutta järvien ja jokien vedenkorkeuden mittaamiseen. Tutkimuksessaan Bandini et al. on testannut ve-denkorkeuden mittaamiseen kolmea erilaista sensoria kustomoidun multikopterin hyöty-kuormana: CLDS-sensori (camera-based laser distance sensor), tutka (radar) ja kaikuluo-tain (sonar). Tutkimuksessa käytetty CLDS-sensori on kehitetty Tanskan teknisessä yli-opistossa ja sen toiminta perustuu etäisyyksien arviointiin mittaamalla kameralle tulevan laservalon kulmaa. Vedenkorkeus määritettiin vähentämällä droonin GNSS-paikantimen mittaamasta droonin lentokorkeudesta sensorin mittaama etäisyys droonin ja vedenpin-nan välillä (kuva 12). Lentokorkeuden tarkkuus saatiin senttimetriluokkaan käyttämällä GNSS-tukiasemaa mittaushetkellä. Dronin GNSS-paikannin ja etäisyyttä mittaavan sensorin voivat sijaita eri osissa RPAS- laitetta, mikä tulee huomioida laitteiden kalibroin-nissa tai systemaattisena virheenä aineistoa käsitellessä.



Kuva 12 Vedenkorkeuden mittaus RPAS-laitteella (mukaillen Bandini et al. 2017)

Vedenkorkeuden mitattuun arvoon vaikuttaa droonin lentokorkeuden määrittäminen GNSS-paikannuksen avulla sekä käytetyn sensorin toimivuus etäisyyden mittauksessa. Bandinin

et al. tutkimuksessa käytetyn kaikuluotaimen todettiin jo maan päällä käsikäytössä yliarvioivan etäisyyttä veden pintaan, minkä arvioitiin johtuvan luotaimen käyttävän ultraääniaallon vähäisestä vedenpinnan läpäisemisestä. Tutkan taas todettiin aliarvioivan mitattua välimatkaa, eikä virheelle osattu kertoa luotettavaa syytä. Tutkan ominaisuuksien todettiin kuitenkin maanpäällisten testimittausten perusteella olevan paras käyttötarkoituksen näkökulmasta; tutkalla on testatuista sensoreista suurin mahdollinen mittausetäisyys ja tutkalla saatujen tulosten tarkkuus ja keskihajonta olivat vain hieman kaikuluotausdataa heikommat. Tutkimuksen aikana tehdyt lennot varmistivat tutkan olevan paras vaihtoehto kolmesta tutkimuksessa kokeillusta sensoreista droonin ja vedenpinnan välisen etäisyyden mittaamisessa. Kaikuluotaimen suurin mittausetäisyys on 10 metriä, ja jo 9 metrin etäisyydeltä mitattu aineisto sisälsi paljon kohinaa. CLDS-sensorin käyttöä haittasi luonnonvalo, joka esti laservalon tarkkaa mittaamista. Tutkankin käytössä esiintyi systemaattista virhettä, sillä mitattu etäisyys kasvoi mitä korkeammalta mittaus tehtiin. Vedenkorkeuden määrittäminen RPAS-laitteella todettiin vaativan differentiaalisen GNSS-paikannuksen kuten RTK:n käyttöä, jotta lentokorkeuden tarkkuus on riittävä. Tutkimuksen johtopäätöksenä RPAS-laitteilla tehtävän vedenkorkeuden mittauksen todettiin voivan tuottaa tarkkoja mittaustuloksia optimaalisella spatiaalisella resoluutiolla. RPAS-laitteiden käyttö antaa joustavuutta tutkimustyölle; otos vedenkorkeudesta saadaan aina tarvittaessa ja olosuhteiden suosiessa RPAS-laitteiden käyttöä. Bandini et al. mukaan differentiaalista GNSS-paikannusta ja drooniin asennettua tutkaa käyttämällä vedenkorkeus pystytään määrittämään ainakin 5–7 cm tarkkuudella GNSS-paikannuksen tarkkuuden ollessa ainakin 3–5 cm ja droonin lentonopeuden ollessa muutama kilometri tunnissa.

Vedenpinnan etäisyyden mittauksessa voidaan hyödyntää myös laserkeilainta (LiDAR), mutta useat laserkeilaimet eivät pysty havaitsemaan vedenpinnalta heijastuvaa signaalia (Bandini et al. 2020). Laserkeilausta ei ole järkevää käyttää ainoastaan vedenpinnan mittausta varten, vaan vedenpinnan korkeus voidaan saada tietoon rantojen rakenteiden laserkeilauksen ja mallintamisen yhteydessä. Vedenpinnan laserkeilausta ja siinä esiintyviä ongelmia ovat tutkineet muun muassa Hopkinson et al. (2011) ja Mandlbürger et al. (2013).

Hopkinson et al. (2011) ovat tutkineet lentokoneeseen sijoitetun laserkeilaimen käyttöä jokisuistoalueen maaston korkeusvaihteluiden sekä vesialtaiden ja uomien vedenkor-

keuksien kartoituksessa. Tutkimuksessa todettiin laserkeilauksen soveltuvan lentokoneesta tehtäviin vedenkorkeusmittauksiin. Vedenpinnan laserkeilauksen ongelmana on kuitenkin takaisin heijastuvien signaalien saturoituminen keilaimen nadiirissa eli suoraan keilaimen alla. Hopkinsonin et al. mukaan signaalien saturoituminen voi aiheuttaa virhettä vedenpinnan korkeuden mittaukseen.

Mandlbürgerin et al. (2013) empiirisessä tutkimuksessa perehdyttiin laserkeilaimen lähettämien signaalien käyttäytymiseen vesi-ilma -rajapinnalla. Tutkimuksessa käytettyjen kahden erilaisen laserkeilaimen signaalin aallonpituudet olivat 532 nm (vihreä) ja 1064 nm (lähi-infrapuna eli NIR). Vihreää signaalia käytetään batymetriamittauksissa ja vesistöjen pohjan kartoituksessa, sillä se läpäisee vedenpinnan tehokkaasti. NIR-signaali ei läpäise vedenpintaa ja sitä käytetään topografiamittauksissa eli maastonmuotojen kartoituksessa. Suuri osa NIR-säteilystä absorboituu veteen, eikä NIR-signaalista välttämättä heijastu tarpeeksi suurta osaa takaisin laserkeilaimelle, jotta vedenpinta voitaisiin havaita laserkeilaimella luotettavasti.

Vedenpinta voidaan havaita myös valokuvista, mutta sen korkeuden mittatarkka määrittäminen valokuvien avulla on haastavaa. Bandini et al. (2020) on selvittänyt fotogrammetristen menetelmien käytön mahdollisuutta vedenpinnan korkeuden mittauksessa. Vedenpinnan fotogrammetriamallinnusta hankaloittavat muun muassa valokuvissa havaitut varjot, vesikasvillisuus sekä kiintopisteiden (key points) puuttuminen. Näkyvä valo myös läpäisee veden pinnan, ja valokuvissa voi olla havaittavissa vedenalaisia kohteita veden syvyydestä ja sameudesta riippuen. Vaikka vedenpinnan mallintaminen on haasteellista, fotogrammetriakuvausta voidaan kuitenkin hyödyntää rantaviivan eli vesirajan havaitsemisessa. Vesiraja voidaan tunnistaa onnistuneesti, kun kasvillisuus ei peitä vesirajaa eikä ranta ole liian jyrkkä. Vesirajan automaattiseen havaitsemiseen voidaan käyttää rajapintoja valokuvista havaitsevia algoritmeja kuten Canny'n reunantunnistusalgoritmia. Muun muassa Ridolfi & Manciola (2018) käyttivät tutkimuksessaan onnistuneesti Canny-menetelmää vesirajan havaitsemisessa betonipatoa vasten. Korkean spatiaalisen resoluution valokuvien fotogrammetrinen käsittely on aikaa vievää, joten fotogrammetristen menetelmien käyttö vesirajan määrittämisessä perinteisten maastomittausten sijasta ei välttämättä ole järkevää. Fotogrammetristen menetelmien käytöstä on kuitenkin hyötyä esimerkiksi vaikeasti saavutettavien kohteiden kaukokartoituksessa ja tutkimuksessa, jossa myös tutkittavan vesistön vedenkorkeuden määrittäminen voi olla olennaista. Eri ajankohtina

tuotetuista georeferoiduista ja orto-oikaistusta ilmapalokuvista voidaan myös seurata vesistön vedenkorkeuden vaihteluita.

Vedenkorkeuden mittausta RPAS-laitteeseen asennetulla tutkalla, laserkeilaimella tai tavallisella kameralla on mahdollista, mutta kerätyn datan käsittely vaatii paljon aikaa, jotta vedenpinta ja sen korkeustieto saadaan määritettyä. RPAS-laitteen käyttö ei ole kannattavaa, jos maastomittausten tarkoituksena on selvittää vedenkorkeus yhdessä tai muutamassa paikassa. Tällöin esimerkiksi käsikäyttöisellä RTK-GNSS-paikantimella tehtävä mittausta on nopeampi keino vedenkorkeuden selvittämiseksi. Droonilla voidaan kuitenkin kartoittaa laajoja alueita nopeasti, ja sen käytöstä voi olla hyötyä silloin kun vedenkorkeusmittauksia tehdään laajalla alueella kuten ojauomastoilla.

#### 4.2.2 Virtaaman mittausta

Vesistöjen virtaamatietoja käytetään vedenkorkeustietojen tavoin vesivarojen käytön suunnittelussa, hydrologisen kiertokulun seurannassa ja vesistömallinnuksissa sekä myös vesi- ja rantarakenteiden mitoituksessa ja tulvatorjunnassa (Korhonen 2007, s.7; Bolognesi et al. 2017). Virtaama  $Q$  on tutkittavan uomaa poikkileikkauksessa  $A$  läpi aikayksikössä kulkeva vesitilavuus [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. Se voidaan määrittää virtausnopeuden  $v(A)$  pintaintegraalina uomaa poikkileikkauksessa  $A$  yhtälön (4) mukaisesti (Korhonen 2007, s.11). Poikkipinta-ala on veden peittämä osuus uomasta, joten poikkipinta-ala muuttuu vedenkorkeuden muuttuessa.

$$Q = \iint_A v(A) dA \quad (4)$$

Vesistön virtaama määritetään yleensä epäsuorasti mittaamalla veden virtausnopeus  $v$  sellaisessa kohdassa uomaa, jossa uomaa pohjan topografia ja poikkileikkaus tunnetaan tai on oletettu tunnetuksi (Bolognesi et al. 2017). Veden virtausnopeutta voidaan mitata in situ esimerkiksi siivikolla, dopplertutkalla tai ultraäänitutkalla (ADCP).

Drooniin asennetulla videokameralla hankitun aineiston analysointia veden virtausnopeuden [ $\text{m/s}$ ] määrittämiseksi on käsitelty useissa tieteellisissä julkaisuissa (Koutalakia et al. 2019; Tauro et al. 2016). Virtausnopeuden määrittämiseen voidaan käyttää optisia mittaustekniikoita kuten PIV-tekniikkaa (Particle Image Velocimetry), joka perustuu videokuvassa havaitun liikkeen tunnistamiseen ja analysointiin. Samaan tapaan PTV-tekniikkaa (Particle Tracking Velocimetry) käytetään yksittäisten partikkelien nopeuden

määrittämiseen. Videokuvasta voidaan määrittää veden pinnalla kelluvan kohteen nopeus, joka on verrattavissa veden virtausnopeuteen veden pintakerroksessa. Videokamera voidaan kiinnittää esimerkiksi siltaan tai muuhun pysyvään kohteeseen tai se voidaan asentaa lentokoneeseen tai drooniin. Droonin on pysyttävä täysin paikallaan videokuvauksen ajan, jotta kuva ei vääristy. (Bolognesi et al. 2017; Koutalakis et al. 2019)

Koutalakis et al. (2019) käytti RPAS-laitteella hankitun videokuvan analysointiin keskitetyssä tutkimuksessaan kolmea eri sovellusta saman aineiston käsittelyyn. Käytetyt sovellukset olivat PIVlab, PTVlab ja KU-STIV. KU-STIV-ohjelmisto käyttää STIV-menetelmää (Space Time Image Velocimetry), joka arvioi virtausnopeutta analysoimalla vedenpinnalla havaittua tekstuuria. Drooni sijoitettiin kuvaamaan joessa sijaitsevaa pientä luonnonkoskea, jonka synnyttämiä pyörteitä hyödynnettiin videokuvassa havaitun vedenpinnan tekstuurin analysoinnissa. Vesi oli hyvin sameaa kuvanottohetkellä. Tutkimuksessa ei käytetty merkkiainetta tai muita kelluvia kohteita, joka olisi helposti havaittavissa videokuvasta. Myöskään lehtiä tai muita luonnollisia seurattavia merkkejä ei esiintynyt kuvatulla videolla. PIV-tekniikkaa hyödyntävä PIVlab-ohjelmisto pystyi tuottamaan nopeusvektoreita vain sellaisissa osissa uomaa, joissa veden pinnalla oli havaittavissa pyörteitä ja aallokkoa. Tutkimuksessa ei tehty tarvittavia in situ -virtausmittauksia, joten videokuva-analyysin tulokset ei ollut verrattavissa muihin mittauksiin. Tutkimus kuitenkin osoitti kolmen eri optisen mittaamenetelmän käytön onnistuvan ilman virtaan lisättäviä merkkikappaleita, kunhan veden pinnassa on havaittavissa tarpeeksi aaltoja, pyörteitä ja muuta tekstuuria.

Tauro et al. (2016) käytti PIV-tekniikkaa käsittelevässä tutkimuksessaan kelluvana merkinä (tracer) biohajoavaa muovailuvahaa. Vaha muovailtiin läpimitaltaan 0,5–1 cm kokoisiksi partikkeleiksi, joiden kirkkaat värit olivat helposti havaittavissa videokuvasta. Tutkimuksessa käytettiin merkkikappaleina myös puiden lehtiä. Tutkimuksessa käytettiin myös droonista suoraan alaspäin vedenpintaan osoitettua laseria, jonka avulla droonilla otetusta videokuvasta pystyttiin manuaalisesti tunnistamaan vakaita kuvasarjoja. Videokuvan analysointiin käytettiin edPIV-sovellusta, joka PIV- ja PTV-algoritmien avulla tuottaa automaattisesti vedenpinnan virtausnopeutta kuvaavia karttoja (surface flow velocity maps). Sovellukseen syötettiin kuvanottotaajuus ja tutkittavan alueen koko veden pinnalla. Tutkimuksessa esille tuli droonin paikallaanpysyvyyden tärkeys riittävän kuvanlaadun varmistamiseksi.

Videokuvan analysointimenetelmien ongelmana on, että niiden avulla voidaan määrittää veden virtausnopeus vain pinnalla. Jokien ja pienten uomien virtausprofiilit vaihtelevat uoman ominaisuuksien mukaan, ja yleensä virtausnopeus on suurin veden pintakerroksissa. Videokuvan analysointia voi vaikeuttaa myös kuvanottohetken sääolosuhteet. Tuuli voi epävakauttaa droonin sen leijuesssa kuvanottohetkellä heikentäen videokuvan tarkkuutta. Tuuli ja sadepisarat voivat myös vääristää PIV-algoritmien analysoimaa vedenpinnan tekstuuria (Koutalakis et al. 2019).

Virtausprofiilin selvittämiseksi on käytettävä vedenpinnan läpäiseviä mittalaitteita. Virtausprofiilien mittauksessa käytetään esimerkiksi ADCP-laitteita (Acoustic Doppler Current Profiler), joiden toimintaperiaatteet ovat verrattavissa kaikuluotaukseen. ADCP-laitteilla voidaan mitata veden virtauksen nopeutta ja suuntaa esimerkiksi joessa. Veden pinnalla kelluvalle alustalle asennettua ADCP-laitteita voisi luultavasti vetää ja ohjata droonien avulla, kuten Bandini et al. (2018) on osoittanut kelluvan kaikuluotaimen tapauksessa. RPAS-laitteiden ja ADCP-sensorien yhteensopivuus vaatii kuitenkin lisätutkimusta. Veden virtausta voidaan mitata myös ultraäänisensoreilla (ultrasonic transducer) ja myös niiden käyttö RPAS-laitteita hyödyntämällä olisi mielenkiintoinen tutkimuskohde. Samoin voitaisiin tutkia doppler-ilmiötä hyödyntävät tutkalaitteiden ja droonien yhteensopivuutta. Menetelmien ongelmana on kuitenkin sensorien kantavuus, niiden koko ja tehonkulutus sekä tiedonsiirto. Tutkalaitteiden värinä voi aiheuttaa mittauksiin virhettä ja kohinaa, joten tutkan alustana käytetyn multikopterin olisi leijuttava täysin paikallaan mittausvirheiden välttämiseksi. Vesistön virtaaman etämittauksen kannalta optimaalinen sensori olisi sekä vedenkorkeutta että veden virtausnopeutta mittaava automatisoituja mittausasemia vastaava järjestelmä.

#### **4.2.3 Lumipeitteen mittaus**

Lumipeitteen paksuuden ja lumen vesi-arvon (SWE) mittauksia käytetään vesistöennusteissa, säännöstelyn suunnittelussa sekä esimerkiksi ilmastonmuutoksen vaikutusten seurannassa. Lumen syvyyden in situ -mittauksessa on perinteisesti käytetty mittasauvaa. Lumen vesi-arvo (SWE) eli lumikuorma voidaan määrittää mittaamalla lumipeitteen paksuus sekä punnitsemalla tunnettu tilavuus lunta, jolloin saadaan selville lumen tiheys. Lumen punnitsemiseen käytetään niin kutsuttua lumipuntaria, jossa punnitaan lieriöllinen lunta. Suomessa lumipeitteen paksuuden ja lumen vesi-arvon mittaus suoritetaan käytännössä lumilinjamittauksilla. Pitkät lumilinjat ovat noin 4 km pitkiä reittejä, joilla tehdään 80 lumen syvyydmittausta ja 8 lumen punnitusta. Pienten valuma-alueiden lumilinjat ovat



noin 2 km pitkiä reittejä, joilla tehdään 50 lumen syvyysmittausta ja 10 punnitusta. Pitkillä lumilinjoilla määritetään silmämääräisesti 25 metrin päähän mittauspisteestä ulottuvan alueen pälvisyys eli lumesta paljaan alueen osuus. Pälvisyysprosentti tarkentaa lumen vesiarvon laskentaa. (Suomen ympäristökeskus 2019a)

Lumipeitteen pälvisyys voidaan helposti havaita droonilla otetuista valokuvista, ja valokuvia analysoimalla tarkka pälvisyysprosentti voidaan saada selville. Erillisistä valokuvista voidaan muokata koko mittausalueen käsittävä ortokuva käyttämällä fotogrammetiaohjelmistoja tai muita ilmavalokuvien orto-oikaisuun soveltuvia ohjelmistoja. Georeferoidusta aineistosta voidaan helposti esimerkiksi paikkatieto-ohjelmistossa eristää mittauspistettä ympäröivä alue, jonka säde on 25 metriä.

Lumen syvyyden etämittausta on mahdollista laserkeilaamalla. Deems et al. (2013) sekä Painter et al. (2016) ovat tutkineet lumipeitteen laserkeilaamista lentokoneeseen asennetulla sensorilla. Tutkimusten tulokset ovat suuntaa antavia myös RPAS-laserkeilaukselle LiDAR-tekniikan kehityksen myötä. Lumipeitteen paksuuden laskenta vaatii kaksi erillistä datan keruuta tutkimuskohteesta; yksi lumettomana ajankohta ja toinen lumipeitteisenä ajankohtana, jolloin lumen paksuus halutaan selvittää. Lumipeitteen paksuus saadaan tuotettujen pistepilvien tai maastomallien erotuksena. Kerätyn aineiston geofereointi on oleellista, jotta tulokset ovat vertailtavissa.

Deems et al. (2013) käsitelivät tutkimuksessaan laserpulssin käyttäytymistä lumipeitteen pinnalla. Lumen ominaisuudet vaikuttavat sen heijastavuuteen. Lumi koostuu jäädä, ilmasta, nestemäisestä vedestä sekä epäpuhtauksista. Useimmat laserkeilaimet operoivat aallonpituudella 532 nm (vihreä) tai 1064 nm (NIR). Jää absorboi NIR-säteilyä enemmän kuin vihreää valoa, jota se siis heijastaa tehokkaammin. Toisaalta vihreää valoa käyttävä laserpulssi tunkeutuu syvemmälle lumipeitteeseen kuin NIR-säteily, mistä voi aiheutua virhettä lumipeitteen korkeuden määrittämisessä. Suurin osa laserkeilaimelle palaavasta heijastuneesta NIR-säteilystä heijastuu senttimetrin syvyisessä kerroksessa lumipeitteen pinnalta, kun taas vihreä valo heijastuu 10 senttimetrin paksuisesta pintakerroksesta.

Painter et al. (2016) käyttivät laserkeilauksen, valokuvauksen sekä maastomittausten yhdistämistä käsittelevässä tutkimuksessaan 1064 nanometrin aallonpituudella operoivaa laserkeilainta lentokoneeseen asennettuna. Georeferoidusta pistepilvestä luotua digitaalista maastomallia käytettiin lumen syvyyden laskentaan. Tutkimuksessa hankittiin myös

tieto lumen tiheydestä tutkimusalueella, jolloin maastomalli pystytettiin muuntamaan lumen vesiaron vaihtelua kuvaavaksi karttaesitykseksi.

Laserkeilaus mahdollistaa tarkan lumipeitteen korkeuden etämittauksen. Se on kuitenkin kustannuksiltaan kallis menetelmä, eikä sen käyttö ole kannattavaa esimerkiksi pinta-alaltaan pienien alueiden tutkimuksessa. Fotogrammetriaa on käytetty laserkeilauksen korvaavana ja edullisempaan mittausmenetelmänä useissa käyttösovelluksissa. RPAS-fotogrammetrian hyödyntämistä lumipeitteen paksuuden määrittämisessä on käsitelty myös useissa tieteellisissä julkaisuissa (Harder et al. 2016; Cimoli et al. 2017). Lumipeitteen paksuus saadaan laserkeilauksen tavoin vertaamalla lumettomana aikana luotuja digitaalisia maastomalleja lumipeitteisten pintamallien kanssa. Malleja vertailemalla saadaan tietoon myös lumipeitteen paksuuden spatiaalinen vaihtelu.

Harder et al. (2016) käyttivät tutkimuksessaan miehittämättömän ilma-aluksen ottamia valokuvia lumipeitteisestä preeria-alueesta ja vuoristoalueesta Kanadassa digitaalisen pintamallin (DSM) luomiseksi. SfM-tekniikalla tuotettujen lumensyvyyksien RMSE-poikkeamiksi saatiin 8,8 cm, 13,7 cm ja 8,5 cm maastosta ja kasvipeitteisyydestä riippuen. Virhettä oli havaittavissa pilvettöminä aurinkoisina päivinä otettujen valokuvien pohjalta luoduissa pintamalleissa. Valokuvat olivat ylivalottuneita, minkä takia SfM-ohjelmisto ei pystynyt mallintamaan lumipeitteen pintaa oikein.

Myös Cimoli et al. (2017) totesivat arktisten alueiden lumipeitteen mallinnusta käsittelevässä tutkimuksessaan lumipeitteen 3D-mallintamisen fotogrammetrisin menetelmin olevan haastavaa. Tasaisesta lumipeitteestä otetuissa valokuvissa ei ole tarpeeksi kontrastivaihteluita tai yksityiskohtia (key points), jotta fotogrammetriaohjelmistot pystyisivät yhdistämään valokuvat. Tutkimuskohteita oli yhteensä kuusi: kaksi Svalbardissa ja neljä Grönlandissa. Droonilla otettujen valokuvien avulla saadut tulokset lumipeitteen paksuudesta erosivat perinteisin maastomittausmenetelmin saaduista tuloksista 1,5-16 cm. Tarkkojen 3D-mallien tuottamista varten tarvittujen maastosignaalien (GCP) käyttö tutkimuskohteessa vei paljon aikaa. Maastossa tehtäviin valmisteluihin kulunutta aikaa olisi voitu lyhentää käyttämällä tarkempaa GNSS-paikannusta, kuten RTK- tai PPK-tekniikkaa, jolloin maastosignaaleja olisi tarvinnut vähemmän aineiston georeferointia varten.

Lumen vesiaron (SWE) määrittämistä kaukokartoitusinstrumentteja käyttäen on kutsuttu lumihydrologian Graalin maljaksi. Lumen vesiaron määrittämistä varten tarvitta-

van lumen tiheyden etämittausta on osoittautunut haasteelliseksi. Melkein jokaisen sähkömagneettisen spektrin osan soveltuvuutta lumen vesi-arvon mittaamiseen on tutkittu, mutta luotettavia tuloksia ei ole juuri saatu. Lumen vesi-arvoja on mitattu passiivisilla mikroaal-tosensoreilla, mutta saaduissa tuloksissa on suurta epätarkkuutta. Myös tutkalaitteita on yritetty käyttää vesi-arvon mittaamisessa, mutta lumen sisältämä nestemäinen vesi absorboi tutkan lähettämiä signaaleja. Myös tutkitun alueen mahdollinen puusto aiheuttaa tutkasignaalin häviötä. (Painter et al. 2016)

Jenssen et al. (2020) on tutkinut tutkalaitteiden käyttöä lumen ominaisuuksien mittaamisessa. UWB-tutkaa (ultra-wideband) eli ultralaajakaistatutkaa voidaan käyttää mittaamaan lumikerroksen paksuus. Samoin Kim et al. (2017) on tutkimuksessaan kehittänyt  $K_u$ -kaistalla (14-16 GHz) operoivan tutkalaitteen lumipeitteen paksuuden mittausta varten. Jenssenin et al. tutkimuksen ensimmäisessä testimittauksessa UWB-tutka läpäisi helposti kuivan ja 10 senttimetriä paksun lumipeitteen ja lumipeitteen korkeuden RMS-poikkeamaksi saatiin 1,16 cm. Tutkimuksessa suoritettu toinen testimittaus oli haastavampi lumipeitteen syvyyden ollessa 170 cm ja lumessa sisältäessä enemmän nestemäistä vettä. RMS-poikkeama oli tuolloin 13,1 cm. Käytetyn tutkalaitteen todettiin pystyvän havaitsemaan lumen kerrostuneisuus, mutta lumen tiheyden määrittäminen vaatii jatkotutkimuksia.

Vaikka lumen vesi-arvoa ei nykyisillä kaukokartoitusinstrumenteilla pystytä tarkasti selvittämään, RPAS-laitteilla hankittuja lumensyvyysmittauksia sekä valuma-alueiden topografiatietoja voidaan käyttää SWE-mallinnuksessa. Esimerkiksi Niedzielski et al (2019) on tieteellisessä julkaisussaan esittänyt menetelmän mallintaa lumen vesi-arvoa käyttämällä sekä lumen tiheyden arviota. Kiintosiipisellä eBee-droonilla otetuista ilmapalokuvista tuotettiin lumipeitteen pintamalleja käyttäen SfM-tekniikkaa. Kartoitettua tutkimusalueesta tuotettua SWE-mallinnusta ekstrapoloitiin regressiomalleja käyttäen kattamaan koko tutkitun joen valuma-alue. Mallinnetun lumen vesi-arvon virhe oli suurimmillaan +18,9% verrattuna maastomittauksiin, mikä selittyy muun muassa lumen tiheyden arvion epätarkkuudella.

RPAS-laitteita voidaan teoriassa hyödyntää lumilinjoiden lumensyvyysmittauksissa, mutta riippuu täysin kohteesta, onko se järkevää. Aikasarjojen jatkuvuuden ja vertailtavuuden varmistamiseksi lumilinjamittaukset tehdään tiettyinä päivinä. RPAS-laitteita ei voida

lennättää kaikissa sääolosuhteissa, joten lentojen ja RPAS-mittausten onnistuminen tietynä päivänä ei voida taata. Lumilinjat ovat 2–4 kilometriä pitkiä, mikä tarkoittaa suurta määrää käsiteltävää kaukokartoitusdataa, jos drooni tekee mittauksia koko linjan pituudelta. Kerätyn aineiston georeferointi ja muu käsittely vie paljon aikaa, mutta toisaalta RPAS-laitteiden käyttö helpottaa tutkimuskohteessa tehtäviä maastotöitä etenkin vaikeakulkuisessa maastossa. On myös huomioitava RPAS-laitteiden toimivuus talven olosuhteissa. Alhainen lämpötila yleensä lyhentää droonin lentoaikaa sen akkujen kuluessa nopeammin. Droonin propelleihin tai siipiin voi tietyissä olosuhteissa muodostua jäätä, joka myös voi lyhentää lentoaikaa tai aiheuttaa toimintahäiriöitä.

Jos lumen syvyys määritetään lumettoman ja lumipeitteisen digitaalisen maastomallin erotuksena, oletetaan, että lumettomana aikana tuotettu referenssiaineisto pysyy muuttumattomana. Jos maaston muodoissa tapahtuu muutoksia, on lumettoman maaston korkeusmalli luotava uudelleen. Lumipeitettä kuvaavan pintamallin generoiminen käyttäen SfM-tekniikkaa ja muita fotogrammetrisia menetelmiä on haastavaa johtuen lumen heijastusominaisuuksista. Useat kamerat eivät pysty käyttämään automaattitarkennusta täysin valkean ja tasaisen lumipeitteen kuvaamiseen, eikä valokuvissa ole tarpeeksi yksityiskohtia SfM-tekniikan käyttämien DIM-algoritmien sujuvaa toimimista varten. Myös karotetun alueen kasvipeitteisyys voi rajoittaa fotogrammetristen menetelmien hyödyntämistä lumipeitteen mallinnuksessa. Uusia ja luotettavammin toimivia RPAS-menetelmiä lumipeitteen mittaukseen voi ilmetä erilaisten sensoritekniikoiden kehittyessä ja sensoreiden keventyessä ajan mittaa.

#### **4.2.4 Veden lämpötilan mittaus**

Vesistöjen pintaveden lämpötilamittauksia tuotetaan vesiensuojelun, tutkimuksen sekä etenkin kesäisin virkistyskäytön tarpeisiin. Pintavesien lämpötiloja seurataan havaintoasemilla, jotka on perustettu vedenkorkeusasemien yhteyteen. Hydrologisiin havaintoihin kuuluvia manuaalisia pintaveden lämpötilamittauksia tehdään myös käsikäyttöisillä lämpötilamittareilla ja käytännössä manuaalinen mittaus tehdään laiturilta tai kiviltä. Syvänveden lämpöluotauksia tehdään tietyillä etukäteen määritetyillä järvisyvänteillä ja niiden suorittamiseen tarvitaan vesikulkuneuvo. (Suomen ympäristökeskus 2019a, s.55-56)

Pintaveden lämpötila voidaan helposti mitata multikopteriin tai kiintosiipisen drooniin asennetun lämpökameran avulla. Lämpökameroilla voidaan havaita ja kartoittaa myös

pohjaveden purkautumispaikkoja vesistössä. Etenkin kesäaikana pohjaveden ja pintaveden lämpötilaerot ovat tarpeeksi selvät pohjaveden purkautumispaikkojen havaitsemisen onnistumiseksi (Pudas & Siiro 2016, s.5). Pohjavesiyhteyksien paikantamista voidaan hyödyntää erilaisten hydrologisten mallinnusten tarkennuksessa ja kalibroinnissa sekä esimerkiksi haitta-aineiden kulkeutumisen mallinnuksessa. Pohjavesiyhteyksien havaitsemista lämpökameroiden avulla ovat tutkineet muun muassa Rossi et al. (2017) ja Ala-Aho et al. (2015). Rossi et al. ovat tutkimuksessaan käyttäneet miehitettyyn helikopteriin asennettua lämpökameraa kahden pohjavesiesiintymän kartoituksessa. Lämpökameralla kuvatuilla harjualueilla sijaitti järviä, jokia, suota sekä metsätalousaluetta. Lämpökuvauksen tuloksena havaittiin järvien rantojen pohjavesiyhteyksiä ja suoalueella havaittiin suojeltuun pohjavesialueeseen aiemmin kuulumattomia lähteitä. Tutkimuksen tulokset painottavat lämpökuvauksen (thermal infrared imaging) soveltuvuutta ja menetelmästä saatavaa hyötyä pohjavedestä riippuvaisten ekosysteemien hallinnassa ja tutkimuksessa.

Myös Ala-Ahon et al. (2015) tutkimuksessa käytettiin helikopteriin asennettua lämpökameraa. Tutkimuksessa mallinnettiin Rokuan pohjavesiesiintymän alueen pintavesien ja pohjavesien rajapintoja HydroGeoSphere-pohjavesimallilla käyttäen pohjatietona lämpökameralla havaittuja pohjavesiyhteyksiä. Lämpökuvauksen keskittyi järvien rantojen lämpökuvaukseen. Teoreettisesti on todistettu, että pohjavettä virtaa eniten järveen sen ranta-alueilla. Tutkimusalueen lämpökartoituksessa käytetty Flir Thermacam P-60 -sensori operoi sähkömagneettisen säteilyn spektrin aallonpituusalueella 750 nm – 1300 nm. Maapikselin koko oli 15 cm kun lentokorkeus oli 150 m järven vedenpinnan yläpuolella. Ilmakuvaus toteutettiin elokuussa, sillä tällöin Rokuan alueen järvien lämpötilan (noin 20 °C) ja pohjaveden (noin 4,5 °C) ero on suurin ja lämpösäteilyn intensiteettivaihtelut ovat helpoiten havaittavissa. Lämpökuvaa-aineistosta havaittiin järven rannalla ympäristöään kylmempiä pohjavesiyhteydestä indikoivia kohtia ja näiden lämpötila-anomalioiden paikkatieto merkittiin manuaalisesti ja tallennettiin ArcGIS-paikkatietojärjestelmään. Paikkatietoa käytettiin onnistuneesti Rokuan pohjavesiesiintymän HydroGeoSphere-mallinnuksessa simuloitujen pohjavesiyhteyksien vertailussa ja validoinnissa.

Esitellyissä tutkimuksissa käytettiin helikopteria ilmasta otettujen lämpökuvien hankintaan, mutta samoja menetelmiä voidaan soveltaa yhtä lailla kiintosiipisillä droneilla ja multikoptereilla hankittuun pintavesien lämpökuvaa-aineiston tulkintaan ja käyttöön. Multikoptereiden avulla voidaan myös käyttää lämpötilaa mittaavaa anturia, joka mahdollistaa veden lämpötilan mittauksen eri syvyyksillä. Vaijerin päähän kiinnitetty lämpötila-

anturi voidaan laskea veden pinnan yllä leijuvasta multikopterista veden pinnan alle. Käytetyn vaijerin on oltava tarpeeksi painava, jotta se ei voi sotkeutua multikopterin propelleihin. Käytetyn vaijerin pituutta ja vinssijärjestelmän kokoa rajoittavat droonin hyötykuorman painorajoitukset.

Chung et al. (2015) ovat järvien sisäistä lämpötilavaihtelua käsittelevässä tutkimuksessaan käyttäneet droonista laskettavaa veden lämpötilaa mittaavaa anturia. Tutkimuksessa mitattiin veden lämpötilaa kontrolloiduissa syvyyksissä järven eri osissa. Käytettyyn FireFly-heksakopteriin oli lisätty myös alaspäin osoitettuja kaikuluotaimia lentokorkeuden kontrolloimisen parantamiseksi, jotta droonia ei vahingossa laskettaisi liian lähelle veden pintaa. Lämpötila-anturiin integroidulta sähköjohtavuussensorilta saatiin suoraan tietoa siitä, onko anturi vedessä. Anturi kiinnitettiin 4 metriä pitkään ohueen taipuvaan muoviputkeen ja anturin laskeminen veteen tapahtui pudottamalla droonin lentokorkeutta. Anturi heilui vapaasti ilmassa lennon aikana mikä lisää laitteiston törmäysriskiä esimerkiksi puihin. Droonilla tehtyjä lämpötilamittauksia verrattiin *in situ* -mittausten kanssa menetelmän validoimiseksi. Kaikki droonilla mitatut lämpötilat olivat korkeampia kuin *in situ* mitatut lämpötilat. Erot tuloksissa vaihtelivat välillä 0,5–1,0 °C ja erot olivat suurempia järven syvissä osissa. Virheen arveltiin johtuvan droonilla tehdyn mittauksen fyysisistä mekanismeista. Tarkkaa syytä ei saatu selville, mutta droonin propellien aiheuttaman ilmavirran sekä vaijerina käytetyn muoviputken liike arveltiin sekoittavan vettä häiriten lämpötilan mittausta suoraan veden yllä leijuvan droonin alla. Jatkotutkimusten ja suurempien otantojen käyttö menetelmän validoinnissa todettiin olevan tarpeellisia.

Myös manuaalisissa syvänveden lämpötilamittauksissa käytetty vene voi sekoittaa vettä ja sen lämpötilakerrostuneisuutta sekä häiritä mitattavaa näytettä veden pintakerroksissa. RPAS-laitteita hyödyntävä lämpötilamittaus voidaan suorittaa vesistön rannalta, eikä venettä tarvita. Menetelmää voidaan käyttää vesistön pinnan ollessa sula mutta talvella jääkerros estää multikopterin kantaman anturin käytön.

### 4.3 Muut tehtävät

RPAS-laitteita voidaan hyödyntää monipuolisesti erilaisissa vesivarojen käyttöön ja hoitoon liittyvissä tehtävissä ja tutkimuksissa vesistörakenteiden ylläpidon ja hydrologisen seurannan tehtävien lisäksi. Kaikkia mahdollisia RPAS-laitteiden käyttökohteita ei ole

mahdollista käsitellä tässä selvityksessä diplomityön rajallisen laajuuden takia. Tässä selvityksessä käsitellyt esimerkit RPAS-laitteiden käyttömahdollisuuksista ovat valikoituneet Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen vesistöyksikön työtehtävien mukaan.

Drooneilla otettuja ilmavalokuvia voidaan käyttää hyödyksi kaikissa hankkeissa, joissa havainnoidaan ympäristöä. Pinta-alaltaan laajojen alueiden kuvaus onnistuu drooneilla nopeasti. Droonien käyttöönotto on yksinkertaista, ja kuvauskohteeseen voidaan siirtyä heti lento-olosuhteiden ollessa kohdillaan ja droonin akkujen ollessa ladatut. Maaston korkeuden mittauksia voidaan suorittaa käyttämällä RPAS-laitteisiin asennettuja sensoreita. Valokuvia hyödyntävät fotogrammetriset menetelmät ovat edullisia, mutta niiden käyttöä korkeusmallien tuottamisessa rajoittaa valokuvauksen kannalta huonot sääolosuhteet sekä kartoitetun maaston kasvipeitteisyys. Laserkeilaimilla voidaan kartoittaa maastonmuodot myös kasvipeitteen alta. Fotogrammetrialla tai laserkeilaamalla tuotettuja digitaalisia 3D-malleja voidaan käyttää myös erilaisten luonnonkohteiden tai rakenteiden inventointiin ja ajalliseen seurantaan.

#### **4.3.1 Tulvien seuranta ja tulvariskien hallinta**

Tulvia esiintyy vesistöissä runsaiden sateiden aikana sekä lumipeitteen sulaessa. Ilmastonmuutoksen myötä sään ääri-ilmiöiden kuten rankkasateiden arvioidaan yleistyvän. Suomessa talven lämpötilojen arvioidaan kohoavan ja samalla suurempi osa sateista sataa lumen sijasta vetenä. Lämpötilojen kohotessa myös talven lumipeitteen sulamisesta aiheutuvat kevättulvat aikaistuvat.

RPAS-laitteita käytetään tulvasuojelussa tulvan levinneisyyden kartoituksessa. Drooneilla tuotetuista valokuvista ja videoista saadaan kattava kokonaiskuva tulvivasta alueesta ja niiden avulla voidaan arvioida tulvan aiheuttamia vahinkoja. RPAS-laitteilla tehtävät tulvien aikaisten vedenkorkeuksien ja virtaamien mittaukset ovat turvallisempia kuin tulvivassa uomassa tehtävät manuaaliset mittaukset.

Maaston korkeustietoja voidaan hyödyntää tulvariskien määrittelyssä esimerkiksi jokien ranta-alueilla ja tulvatasangoilla. Tulvatasankoja voidaan mallintaa fotogrammetrisin menetelmin sekä laserkeilaamalla. Luppichini et al. (2019) ovat julkaisussaan käsitelleet fotogrammetristen menetelmien hyödyntämistä tulvatasankojen korkeusmallien luomisessa. Versilia-joen valuma-alueella Pohjois-Italiassa sijaitsevalta tutkimusalueelta aiemmin vuosina 2008–2010 laserkeilauksella tuotettu korkeusmalli ei alhaisesta spatiaalisesta

resoluutiostaan (1 m) johtuen sisältänyt tietoa kaikista vesistörakenteista kuten 40 cm leveistä valleista. Tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa korkeamman spatiaalisen resoluution korkeusmalli alueelta, jotta alueelta pystytään tekemään tarkempia tulvamallinnuksia. Pinta-alaltaan 0,59 km<sup>2</sup> tutkimusalueen digitaalinen korkeusmalli tuotettiin Agisoft Photoscan -ohjelmistolla käyttäen yhteensä 2651 valokuvaa ja 168 maastosignaalia (GCP). Tuotetun korkeusmallin RMS-poikkeama oli 4,0 cm. Käytetyllä menetelmällä saatiin mallinnettua 1–2 kilometriä päivässä huomioiden sekä datan keruu että sen fotogrammetrinen käsittely. Tutkimuksessa tuotetun korkeusmallin käyttö mahdollisti aiempaa tarkemman virtausmallinnuksen tutkitun joen tulvatasangolla.

Droonilla otettuja valokuvia ja SfM-tekniikkaa käyttäen luodut digitaaliset korkeusmallit ovat mittatarkkoja, suhteellisen nopeita sekä edullisia tuottaa ja ne mahdollistavat uomien morfologian variaation seurannan. Ajantasaisten korkeusmallien avulla myös erilaiset hydrologiset mallit ja tulvamallinnus voidaan päivittää ajan tasalle, mikä hyödyttää tulvariskien kartoitusta. (Luppichini et al. 2019; Wang & Xie 2018)

Rankkojen sateiden sekä sulamisvesien lisäksi uoman tukkeutuminen voi aiheuttaa sen tulvimista. Drooneja voidaan käyttää uoman tukkeutumisen syyn selvittämiseksi. Uoman tukkeutumisen voi aiheuttaa esimerkiksi pieneen uomaan kerääntynyt kiintoaine tai vaikka majavan kaatamat puut (kuva 13).



Kuva 13 Oletetusti majavan kaatamia puita joen rannalla



Talvisin tulvia voivat aiheuttaa myös jokiin muodostuvat hyyde- ja jääpadot. Hyyde eli suppojää muodostuu veden alijäähtyessä kun jääkantta ei ole muodostunut suuren virtaaman takia. Alijäähtyneessä vedessä muodostuu jääsohjoa eli suppojäätä, joka kulkee virtauksen mukana. Hyyteen esiintymistä on vaikea ennustaa, mutta suppojäätä kasautuu usein samoihin paikkoihin, joten kokemus aiempien vuosien hyydepatopaikoista auttaa hyyderiskin ennustamisessa. Hyydetulvien aiheuttamien vahinkojen ehkäisemiseksi hyydetilannetta seurataan esimerkiksi jokien varsille asennettujen riistakameroiden avulla ja tarvittaessa uoman tukkivaa suppojäätä poistetaan uomasta kaivinkoneella. Suppojää voi myös kasautua joen peittävän jääkannen alle, jossa se estää veden virtausta. Se voi myös tarttua uoman pohjaan ja muodostaa pohjajäätä, joka voidaan havaita droonilla hankitusta kuvamateriaalista. Kuvassa 14 on esitetty rajausta Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen vesistöyksikössä tuotetusta kuvamateriaalista. Kuva on otettu suomalaisen VideoDrone Oy:n kehittämällä ja valmistamalla GeoDrone X4L -nelikopterilla, jonka hyötykuormana käytettiin Sony RX RII -digitaalikameraa. Leuto talvi vuonna 2020 sekä GeoDronen pakkasensietokyky mahdollistivat helmikuussa tehdyn lennon. Kuva on Ähtävänjoelta, jossa hyydetulvat ovat yleisiä. Vaikka joen vesi on tummaa, pohjajää on selvästi havaittavissa luonnonkosken kohdalla droonilla otetusta ilmakuvasta. Kuvantulkinnan helpottamiseksi ilmakuvia voidaan parannella esimerkiksi kuvan kontrastia säätämällä. Sony RX RII -kameralla otetuista 42 megapikselin valokuvista yksityiskohdat ovat helposti havaittavissa maapikselin (GSD) ollessa muutamia senttejä suurilla lentokorkeuksillakin. (Vesi.fi 2020)



Kuva 14 Pohjajäätä näkyvissä Ähtävänjoella otetussa ilmakuvassa

Jokiuomiin voi muodostua jääpatoja kevättalvella jäidenlähdön aikaan. Joen jääpeitteen alkaessa sulaa se rikkoutuu ja siitä irtoaa jäälauttoja. Jäälautat pakkaantuvat kiinteää jääpeitettä vasten tai jumittuvat esimerkiksi uomassa oleviin siltarakenteisiin, jolloin ne tukivat uoman ja estävät veden virtausta. Jääpatoja täytyy hajottaa kaivinkoneella, jos uoman tulvimisesta aiheutuu haittaa. Jääpadon heikoimman kohdan löytämiseksi voisi käyttää drooniin asennettua lämpökameraa. Jääpatojen esiintymisaikaan kuitenkin matala lämpötila ja mahdollinen lumisade voivat rajoittaa RPAS-laitteiden toimivuutta ja niiden turvallista käyttöä.

#### **4.3.2 Kunnostuskohteiden seuranta**

Vesistökuunnostusten tavoitteena voi olla vesistön tilan tai vedenlaadun parantaminen, viihtyisyyden lisääminen tai luonnon monimuotoisuuden köyhtymisen ehkäiseminen. Kunnostuskohteiden kuten esimerkiksi ojitusalueille perustettavien kosteikkojen suunnittelussa voidaan hyödyntää drooneilla hankittavaa aineistoa. Ilmavalokuvista ja laajoista alueista generoiduista ortoilmakuvista voidaan visuaalisesti hahmottaa suuria kokonaisuuksia helpommin kuin maan pinnalta tehdyissä havainnoissa.

Droonikuvauksella voidaan myös seurata kunnostushankkeiden toteutumista sekä dokumentoida ja raportoida hankkeen etenemistä. Digitaalisia maasto- ja korkeusmalleja voidaan hyödyntää ympäristön muutosten seurannassa ja tilavuuksien laskennassa. Esimerkiksi ruoppausmassojen tilavuus voidaan laskea fotogrammetrisia menetelmiä hyödyntämällä, jos massat on sijoitettu ilmakuvissa näkyvälle paikalle.

Myös erilaisten luontokohteiden kuten lintuvesistöjen, purojen tai luontotyyppien inventointi voi olla RPAS-laitteella hankittua kuvamateriaalia tulkitsemalla nopeampaa ja helpompaa kuin maastotutkimusten suorittaminen. Pienvesistöjen kuten purojen inventaariota RPAS-laitteiden avulla voi rajoittaa puroja ympäröivän maaston ominaisuudet. Pientä puroa ei välttämättä voida havaita ilmavalokuvista tiheän kasvillisuuden seasta. Ilmakuvaus voidaan suorittaa keväällä tai syksyllä kasvillisuuden ollessa harvempaa, mutta silloin hankitussa kuvamateriaalissa kaikkea inventoitavaa purokasvillisuutta ei ole näkyvissä.

### 4.3.3 Eroosiokartoitus

Eroosiolla tarkoitetaan kiintoaineksen irtautumista, kulkeutumista ja kasautumista ulkoisen voiman, kuten veden virtauksen tai tuulen, takia. Maaperän kulumisen eroosion seurauksena on luonnollinen prosessi, mutta ihmistoiminta kuten maankäyttö ja peltoviljely voi kiihdyttää eroosioprosesseja. Jokirantojen eroosiosta ja kulumisesta johtuvat rantojen sortumat ja vyörymät voivat aiheuttaa vahinkoa ranta-alueilla sijaitseville teille, pelloille ja rakennuksillekin.

Jokirantojen eroosion laajuutta voidaan kartoittaa lennättämällä droonia joen suuntaisesti ja kuvaamalla jokitörmiiä. Valokuvista voidaan havaita törmien kulumista tai rannan suuntaisia railoja, jotka voivat olla merkki sortumapinnasta. Eri ajankohtina otetuista ilmakuvista voidaan havaita muutoksia rantaeroosion määrässä.

Kuten maapadoista ja tulvapenkereistä, myös jokirannoista voidaan myös tuottaa korkeus- ja maastomalleja esimerkiksi laserkeilaamalla tai fotogrammetristen menetelmien avulla. Korkeusmalleista voidaan saada selville rinteiden kaltevuus, joka vaikuttaa eroosioriskin suuruuteen esimerkiksi jokirannoilla. Eri ajankohtina luotuja georeferoituja korkeusmalleja vertailemalla rantojen muodonmuutokset voidaan havaita. Muun muassa Casagli et al. (2017) ovat tutkineet maanvyörymien ennustamista fotogrammetrisillä menetelmillä luotujen digitaalisten korkeusmallien vertailun avulla. Tutkimuksen aikana droonilla tehtiin kolme lentoa ja lennoilla otetuista valokuvista luotiin vertailtavat korkean resoluution ( $GSD=5\text{ cm}$ ) georeferoidut digitaaliset maastomallit (DTM). Maastomalleja vertailtiin morfologisten muutosten havaitsemiseksi. Vertailun tuloksena havaittiin kaksi maanvyörymää. Ensimmäisessä havaitussa vyörymässä liikkuneen massan tilavuus oli  $480\text{ m}^3$  ja toisessa vyörymässä  $70\text{ m}^3$ .

Hemmelder et al. (2018) ovat tutkineet droonilla otettujen kuvien hyödyntämistä palmikkojen uoman muutosten ja eroosioprosessien seurannassa. Kaakkois-Ranskan Petit Buëch -joen Natura 2000 -alueella sijaitsevasta tutkimusalueesta tuotettiin korkean spatiaalisen resoluution ortomosaiikki ja digitaalinen korkeusmalli vuonna 2014 ja vuonna 2015 käyttämällä SfM-tekniikkaa hyödyntävää Agisoft PhotoScan -ohjelmistoa. Ilmavalokuvat otettiin kiintosiipiseen drooniin asennetulla Canon PowerShot D10 RGB -kameralla, jonka kuvien resoluutio oli  $4000\times 3000$  pikseliä. Droonia lennettiin manuaalisesti tutkitun jokiuoman yllä. Lentokorkeudeksi määrittyi 130 metriä tutkitun tulvatasanteen

koon sekä halutun spatiaalisen erotuskyvyn ( $GSD=3\text{ cm}$ ) perusteella. Kuvien georeferointia varten kuvatulalta alueelta kerättiin 40 maastosignaalin (GCP) sijaintitiedot RTK-GPS Trimble R8 GNSS -paikantimella. Lisäksi RTK-GPS:llä mitattiin 23 kiintopisteen sijaintitiedot, joita käytettiin tuotettujen digitaalisten korkeusmallien virheiden määrittämisessä. Korkeusmallista havaittiin selkeitä satunnaisia virheitä (outlier), jotka johtuivat jokiuoman päälle kaartuvista puista. Georeferoidusta ortomosaiikista mitattiin joen leveys kuvanottohetkillä vuosina 2014 ja 2015 ja leveyttä verrattiin samassa paikassa tehtyihin maastomittauksiin. Vuoden aikana jokiuoman mutkittelu joen tulvatasanteella muuttui ja rannan maa-ainesta erodoitui virran kuljetettavaksi. Palmikkojoen havaitusta levenemisestä (vetäytymisestä) laskettiin erodoituneen maa-aineksen tilavuus. Tilavuus laskettiin määrittämällä vetäytyneen rannan kokonaispinta-ala ja kertomalla se jokitor-  
män korkeuden ja jokiuoman tulvatasanteen korkeuden erotuksella. Vuoden välein tehtävä eroosiokartoitus oli tutkimuskohteessa riittämätön eroosiotapahtumien syyn selvittämiseksi, sillä tutkittu palmikkojoki on voimakkaasti erodoituva. Hemmelderin et al. mukaan droonikuvaus ja korkeusmallien tuottaminen tulisi suorittaa jokaisen havaitun suuren virtaaman jälkeen kuten rankkasateiden aiheuttaman pintavalunnan jälkeen, jotta virtaaman vaikutusta eroosioprosesseihin voidaan tulkita paremmin. Palmikkojoen aktiivisten uomien syvyyden havainnointia tutkimuksessa rajoitti vedenpinnalta heijastuva valo. RPAS-laitteilla hankittujen ilmavalokuvien todettiin kuitenkin soveltuvan joen dynamiikan ja uoman muodonmuutosten seurantaan. Korkean spatiaalisen resoluution ilmavalokuvista voidaan havaita pienetkin muutokset.

Drooneja voidaan hyödyntää myös muissa maaperän tutkimuksen sovelluksissa kuten maan kosteuden mittauksessa. Muun muassa Wu et al. (2019) ovat tutkineet drooniin asennetun maanpinnan läpäisevän tutkan eli maatutkan käyttöä maan kosteuden kartoituksessa. Tutkimuksessa käytetty tutkajärjestelmä koostui vektoripiirianalysointilaitteesta sekä signaalia lähettävästä ja vastaanottavasta ultralaajakaistaisesta antennista (monostaattinen tutka) ohjausjärjestelmineen. Tutkimuksessa käytetyn antennin operoinnin taajuusalue määrittyi Rayleighin kriteerien mukaisesti 500–700 Hz taajuuksien alueelle maa-aineksen karkeuden vaikutuksen minimoimiseksi. Tutkituksessa pyrittiin tutkaamaan maaperän 10–20 cm paksua pintakerrosta, jossa on havaittavissa maan kosteuden distributioon vaikuttavia rakenteellisia ominaisuuksia. Belgiassa sijaitsevan tutkimusalueen peltojen maan kosteuteen vaikuttaa lähinnä maastonmuodot, jotka pystyttiin kartoittamaan käyttämällä RPAS-fotogrammetriaa. Tutkajärjestelmä suoritti pistemäisiä

mittauksia, joita oli hehtaarilla keskimäärin 1500 kappaletta. Maatutkajärjestelmällä hankitusta aineistosta tuotetut maankosteuskartat vastasivat alueiden korkeuskartoituksen tuloksia. Alavilla peltoalueilla havaittu maankosteus oli suurin. Menetelmän ongelmana on kuitenkin droonin ja antennin vuorovaikutuksesta aiheutuvat virheet, kuten tutkalaitteen havainnointikulman muuttumisesta droonin ennakoimattomien liikkeiden takia. Lisätutkimuksia suunnitellaan muun muassa signaalin erottamisen helpottamiseksi kohinan seasta sekä droonin ja antennin vuorovaikutuksesta aiheutuvan epätarkkuuden minimoimiseksi.

#### 4.3.4 Vedenlaadun seuranta

Vedenlaatua seurataan vesistön tilan määrittystä ja vesistön kunnostustarpeen arviointia varten. Myös vesistökuunnostusten vaikutuksia voidaan havainnoida seuraamalla muutoksia vedenlaadussa. Vedenlaadun seurantaan kuuluu visuaalinen arviointi veden näkösyvyydestä ja veden väristä sekä fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien mittaus. Vesinäytteistä mitataan muun muassa ravinteiden kuten kokonaistypen ja kokonaisfosforin määrä, veden pH-arvo, veden sähkönjohtavuus ja lämpötila sekä veden happipitoisuus.

Kaukokartoitusmenetelmien avulla voidaan arvioida vedenlaatua visuaalisesti. Ilmavalo-kuvista voidaan seurata esimerkiksi levätilannetta tai öljyvahinkoja. Hyperspektrikameroilla voidaan kerätä myös yksityiskohtaisempaa dataa vedenlaadusta ja havainnoida esimerkiksi leväkukintoja. Shang et al. (2017) ovat tutkineet haitallisen levän (kasviplanktonin) määrän ja levinneisyyden havainnointia Kiinassa Weitou Bay -merenlahdella droonien avulla. Tutkimuksessa kiintosiipiseen drooniin asennettu hyperspektrisensori (spektroradiometri) mittasi merenpinnan heijastavuutta ja se operoi aallonpituusalueella 360-1000 nm. Droonin lentokorkeus oli 300 metriä, jolloin maapikseli (GSD) oli 5,2 metriä. Hankittua aineistoa verrattiin MODIS-satelliittidatan avulla tuotettuun sinilevän tunnistavaan spektraaliseen indeksiin, jonka muodostamiseen on käytetty aallonpituusalueita 645 nm, 859 nm ja 1240 nm. Drooneihin asennetun hyperspektrisensorin todettiin onnistuneesti kartoittamaan rannikon sinileväesiintymiä. Satelliiteilla tai lentokoneilla ei aina ole mahdollista havaita sinileväesiintymien laajuuden nopeita muutoksia, mutta droonien käytön joustavuus mahdollistaa leväesiintymien tutkimuksen. Ongelmana droonilla kerätyn aineiston käsittelyssä oli kuitenkin se, että useimmat ilmakehästä aiheutuvien virheiden korjausmenetelmät on kehitetty satelliittiaineiston käsittelyä varten.

Myös Guimarães et al. (2017) ovat hyödyntäneet spektraalista indeksiä vedenlaadun tutkimuksessa. Tutkimuskohde oli brasilialaisen yliopiston alueella sijaitseva pieni tekojärvi, jonka veden klorofyllipitoisuus (klorofylli-a) pyrittiin selvittämään käyttämällä droonilla hankittua kuvamateriaalia. Modifioitu normalisoitu kasvillisuusindeksi NDVI-mod muodostettiin kiintosiipiseen SenseFly Swinglet CAM -drooniin asennetun NGB-kameran keräämän aineiston avulla. Käytetty NGB-kamera operoi lähi-infrapun (N), vihreän valon (G) ja sinisen valon (B) kaistojen aallonpituusalueella. Canon ELPH 110HS -kamera oli modifioitu mittaamaan punaisen valon kaistan sijasta lähi-infrapunasäteilyä. Lentokorkeus oli 170 metriä ja 25 hehtaarin tutkimusalueesta otettiin yhteensä 28 kuvaa. Ilmakuvien georeferointiin käytettiin alueelle tasaisesti levitettyjä kuutta maastosignaalia. Kuvien orto-oikaisu tehtiin Pix4D-ohjelmistolla. Georeferoidusta ortokuvasta muodostettiin modifioitu normalisoitu kasvillisuusindeksi NDVImod, jonka määrittämiseen ei tavallisen NDVI:n tapaan käytetty punaista valoa vaan lähi-infrapunasäteilyä (NIR) ja sinistä valoa (B) yhtälön (5) mukaisesti.

$$NDVImod = \frac{NIR-B}{NIR+B} \quad (5)$$

Järvellä tehtiin myös *in situ* mittauksia 20 eri mittauspisteessä Spectral Evolution SR-3500 -spektroradiometrillä, jolla määritettiin veden spektraalista heijastavuutta (reflektanssi). Veden klorofyllipitoisuus määritettiin myös vesinäytteistä spektrofotometrisin menetelmin. Tutkimuksessa käytettiin kolmen käytetyn menetelmän (droonikuvaus, spektroradiometri ja vesinäytteen analysointi) korrelaatiota veden klorofyllipitoisuuden arvioinnissa. Näytteenottopisteiden (20 kpl) pikseleiden NDVImod-arvo poimittiin ja sitä verrattiin muilla mittausmenetelmillä saatuun veden klorofyllipitoisuuteen. Kaksi vertailupistettä sijaitsi järven varjoisilla alueilla, joten ne jätettiin huomiotta. Rantakasvillisuudesta aiheutuvat varjot muuttavat vedenpinnan tutkittuja heijastusominaisuuksia. Vesinäytteiden laboratoriossa mitatun klorofyllipitoisuuden ja NDVImod-arvon korrelaatio kertoimen (r) kerrottiin olevan 0,71 ja R<sup>2</sup>:n olevan 0,51. Guimarãesin et al. mukaan NDVI:n hyödyntämistä käsitteleviä julkaisuja on vain vähän ja korrelaatiotuloksia ei voitu verrata muissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin. NDVI soveltuu paremmin voimakkaasti rehevöityneiden vesistöjen veden klorofyllipitoisuuden arviointiin ja kasvillisuuden kartoitukseen, kuin tutkimuksen kohteena olleen vähäravinteisen pienen tekojärven klorofyllipitoisuuden määrittämiseen.

RPAS-laitteiden hyötykuormaksi voidaan asentaa kaukokartoitusinstrumenttien lisäksi myös vedenlaatua mittaavia antureita sekä näytteenottimia. RPAS-laitteiden käyttö veden kontaktimittauksessa helpottaa työskentelyä, sillä vesikulkuneuvoa ei tarvita. Tietyissä kohteissa, kuten prosessialtailla, pääsy veden äärellä voi olla haastavaa. Droonia ja siihen asennettua näytteenotinta voidaan turvallisesti operoida kauempaa, kunhan näköyhteys säilytetään ja ohjausyhteydet toimivat. Näytteenottoa droonilla on testattu muun muassa Suomessa toteutetussa DROMINÄ-hankkeessa (Suomen ympäristökeskus 2019b) sekä Koparanin et al. (2018) tutkimuksessa.

Oulun yliopiston Mittaustekniikan yksikön, Geologian tutkimuskeskuksen sekä Suomen ympäristökeskuksen vuosina 2017-2018 toteuttamassa DROMINÄ-hankkeessa (Suomen ympäristökeskus 2019b) tutkittiin droonien soveltuvuutta vesinäytteenotossa ja vedenlaatuanturien käytössä. Tutkimuksessa käytettiin kuluttajamarkkinoillakin suosittua DJI Phantom 4 Pro -nelikopteria sekä suuremman kokoluokan DJI Matrice 600 Pro -heksakopteria. Phantom-nelikopteria käytettiin vedenlaadun mittausantureiden kuljettamiseen ja laskemiseen veden pinnan alle. Phantom-nelikopteriin on integroitu kamera ja siihen lisättiin mahdollisimman kevyt anturi, joka mittasi veden sähkönjohtavuutta. Käytetyssä mittausanturissa oli nopea vasteaika, mikä mahdollistaa mittaukset useilta syvyyksiltä sekä mahdollisesti useasta mittauspisteestä samalla lennolla.

Matrice-heksakopteriin oli asennettu näytteenotin, jossa oli kaksi näyteputkea. Yhden näytteen tilavuus oli 0,75 litraa. Heksakopterin kantokyvyksi on ilmoitettu 6 kg. Kopterin ja hyötykuorman yhteenlaskettu suurin lentoonlähtömassa on 15,1 kg. Ohjaimen laajenuksella ohjattiin vinssiä, jossa oli 10 metrin vaijeri. Drooniin oli turvavarusteeksi asennettu paukkuliivi, joka estää RPAS-laitteen uppoamisen, jos kopteri jostain syystä putoaa veden päällä lennettäessä.

DROMINÄ-hankkeessa näytteenotto sekä vedenlaatuanturien käyttö droonilla todettiin onnistuneeksi. RPAS-laitteiden käytön todettiin parantavan näytteenoton luotettavuutta sekä toistettavuutta, sillä RPAS-laitteen ja näytteenoton tarkka sijaintitieto saatiin selville droonin paikannusjärjestelmän avulla. Myös tarkka näytteenottosyvyys ja näytteenotimen asentotieto rekisteröitiin. RPAS-laitteilla suoritettava vedenlaadun mittaus ja näytteenotto on työturvallinen vaihtoehto vaikeissa kohteissa. Etuna nähtiin myös se, että vesikulkuneuvolle ei ole tarvetta. Heikkoutena droonilla tehtävässä vesinäytteenotossa on droonin rajallinen lentoaika etenkin hyötykuorman painon ollessa suuri näytteenotinta

käytettäessä. Aikaa näytteenotolle voi olla käytettävissä vain varttitunti laitteiston suuren painoin takia, joten näytteenotto kaukaa vesistön rannasta voi olla haasteellista. Riski droonin ja sen hyötykuorman vaurioitumiselle akkujen tyhjentymässä on suuri lennettäessä veden yllä. Hankkeessa käytetyt RPAS-laitteet eivät myös kestäneet sadetta tai kovaa tuulta, joten laitteiden käytön onnistuminen on sääolosuhteista kiinni.

Koparan et al. (2018) käyttivät tutkimuksessaan myös kustomoitua multikopteria, johon oli asennettu näytteenotin. Käytetty näytteenotin oli toimintaperiaatteelta Limnos-näytteenottimen kaltainen. Näytteenotin oli suljettu lieriö, jonka molemmat päät avautuvat sen ollessa vedessä ja lieriö täyttyy vedellä. Droonin elektroniikka oli päällystetty veden aiheuttamien vaurioiden ehkäisemiseksi. Droonin avulla otetusta vesinäytteestä mitattiin liuenneen hapen pitoisuus, sähkönjohtavuus, pH-arvo, lämpötila sekä klooripitoisuus. Tuloksia verrattiin perinteisin menetelmin samasta paikasta hankitun vesinäytteen kanssa. Kuten DROMINÄ-hanke, myös Koparan et al. totesi RPAS-laitteilla tehtävän näytteenoton olevan mahdollisesti turvallisempaa sekä nopeampaa kuin manuaalisesti tehtävä näytteenotto pinta-alaltaan ja vesitilavuudeltaan suurissa sekä vaikeasti saavutettavissa vesistöissä.

#### **4.3.5 Kasvillisuuden kartoitus**

Drooneja on muiden kaukokartoituslajustojen ohella käytetty paljon kasvillisuuden kartoituksessa. Kasvillisuuden määrää ja laatua voidaan havainnoida ja seurata erilaisten kaukokartoitusmenetelmien kuten valokuvauksen ja monikaistakuvauksen avulla. Kasvillisuuden tila indikoi myös ympäristön tilaa, ja esimerkiksi maaperän pilaantumista tai sen kuivuutta voidaan arvioida tutkimalla kasvien elinvoimaisuutta. Vastaavasti vesikasvillisuuden määrä ja laatu kuvastavat niiden elinolosuhteita ja ovat verrannollisia veden laatuun. Vesistöjen rehevöityminen eli ravinteiden (typen ja fosforin) kertyminen vesistöön on ongelma useissa matalissa järvissä. Järven rehevöityminen aiheuttaa happikatoa, joka taas vähentää järven eliöstön monimuotoisuutta. Järven rehevöitymisen merkit voidaan havaita vuosia ennen järven tilan vakavaa heikkenemistä. (Sarvilinna & Sammal-korpi 2010, s.11–12)

Vesiympäristöjen kasvillisuutta ja vesistöjen rehevöitymistä voidaan havainnoida RPAS-laitteiden ottamien valokuvien avulla. Droonin lentokorkeudesta ja käytetyn kamerasäädin optiikasta riippuen voidaan tuottaa korkean spatiaalisen resoluution ilmavalokuvia, joista



voidaan saada hyvin yksityiskohtaista tietoa maan kasvipeitteestä sekä vesikasvillisuudesta. Valokuvia visuaalisesti analysoimalla voidaan tunnistaa kasvilajeja, laskea niiden lukumäärää tai niiden peittämää pinta-alaa sekä arvioida kasvillisuuden kuntoa ja elinvoimaisuutta. Husson et al. (2014) ovat Pohjois-Ruotsiin sijoittuneessa tutkimuksessaan käyttäneet kiintosiipistä SmartOne-droonia järvi- ja jokiympäristön ortoilmakuvien tuottamiseen tarkoituksenaan tunnistaa kasvilajeja tuotetusta kuvamateriaalista. Droonin lentokorkeus oli 150 metriä ja maapikselin koko 5,6 cm. Valokuvien lentoreitin suuntainen sekä sivuttainen limittäisyys oli 70 %. Droonilla otetuista valokuvista tuotetuista ortomosaiikeista pystyttiin tunnistamaan kasvilajit järviympäristössä 95,1 prosentin tarkkuudella ja jokiympäristössä 80,4 prosentin tarkkuudella verrattuna maastossa suoritettuun kasvintunnistukseen. Ortomosaiikeista tuotettiin kasvillisuustyyppien lukumäärää ja pinta-alaa kuvaavia karttoja, joiden manuaaliseen digitointiin käytettiin ArcGIS-paikkatieto-ohjelmistoa. Suuria alueita kattavien ilmavalokuvien visuaalinen analysointi vie kuitenkin paljon aikaa.

Reaaliaikaiseen kasvien tunnistukseen tai droonilla kerätyn ilmakehän aineiston analysointiin on mahdollista käyttää myös konenäköä ja tekoälyä. Suomen ympäristökeskuksen (2019c) ”Tekoäly ja IoT- vesiriskien ja vesivarojen hallinnassa (ÄlyVesi)” -hankkeessa tutkitaan syväoppimisen ja tekoälyn käyttömahdollisuuksista vesivarojen hallinnassa sekä vesiturvallisuuden lisäämisessä. Esineiden internetin eli IoT:n (Internet of Things) periaatteisiin kuuluu sensorien ja muiden laitteiden automatisoitu tiedonsiirto sekä etäohjaus internetyhteyden avulla. ÄlyVesi-hankkeessa on kerätty syväoppimisen koulutusdataa ja käytetty sitä kasvilajien tunnistamisessa ja biomassan määrän arvioimisessa RPAS-laitteiden ja konenäön avulla.

Droonien ottamista ilmavalokuvista voidaan tunnistaa myös vieraslajeja, jotka eivät ole tarkastellun alueen alkuperäislajeja, vaan ne ovat tahattomasti tai tahallaan siirretty alueelle muualta. Haitalliset vieraslajit uhkaavat alueelle ominaisen luonnon monimuotoisuutta. Esimerkiksi haitallisiin vieraslajeihin kuuluva jättipalsami viihtyy virtavesien rannoilla, ja sen hennot juuret edistävät jokirantojen eroosiota. Jättipalsami levittäytyy tehokkaasti jokivarsilla, joten kasvustot täytyy kitkeä. Kasvustoja voidaan paikantaa ja niiden laajuus arvioida droonien avulla, mikä helpottaa käytännön torjuntatyön suunnittelua sekä toteutusta. Myös vieraslajien tunnistamisessa on mahdollista hyödyntää konenäköä.

Michez et al. (2016) ovat tutkimuksessaan pyrkineet tunnistamaan kolme eri vieraslajeiksi määriteltyä kasvilajia droonilla tuotettujen ortoilmakuvien avulla. Eteläisessä Belgiassa sijaitsevalla tutkimusalueella oli tarkoituksena tunnistaa jokivarren vieraslajeja. Tutkitut vieraskasvilajit olivat myös Suomeen levinneet jättipalsami, kaukasianjättiputki ja japanintatar. Kiintosiipisellä Gatewing z100 UAS -dronilla otetuista valokuvista tuotettiin ortokuvat käyttämällä Agisoft Photoscan -ohjelmistoa. Lentokorkeus vaihteli 100 metristä jopa 750 metriin ja ortokuvien maapikselin koko oli 10 cm ja 5 cm. Ilmavalokuvien limittäisyys leveys- ja pituussuunnassa oli 75 %. Kasvien tunnistusta ortokuvista automatisoitiin käyttämällä ohjattua luokitusta (supervised classification), joka perustui satunnaisen metsän algoritmiin (random forest). Kaukasianjättiputki onnistuttiin tunnistamaan ortokuvista, mutta jättipalsamin ja japanintatarin tunnistaminen tuotti ongelmia tutkimuksen kuvauslentojen ajankohdan takia. Michez et al. painottavat kuvauslentojen ajankohdan merkitystä, sillä kasvien fenologinen vaihe (kukinta) vaikuttaa merkittävästi kasvilajin onnistuneeseen tunnistamiseen. Kuvausajankohta tulee valita kartoitettavan kasvilajin fenologian mukaan.

Kasvillisuutta voidaan havainnoida ja kartoittaa valokuvauksen lisäksi myös muiden kaukokartoitusmenetelmien avulla. Laserkeilauksen avulla voidaan mitata puuston korkeutta ja mallintaa kasvipeitteen muotoa. Multi- ja hyperspektrikuvista voidaan analysoida muun muassa kasvillisuuden määrää käyttämällä aiemmin veden klorofyllipitoisuuden arvioinnissa esiteltyä normalisoitua kasvillisuusindeksiä NDVI. (Jones & Vaughan 2010, s.165)

Normalisoitua kasvillisuusindeksiä vesikasvillisuuden kartoituksessa droonien avulla ovat käyttäneet muun muassa Chabot et al. (2018) niin ikään vieraskasvilajin kartoitusta käsittelevässä tutkimuksessaan. Tutkimuksen kohteena oli vesikasvilaji sahalehti (*Stratiotes aloides*), jonka levittäytymistä Kanadan Ontariossa sijaitsevassa Seymour Lake -järvessä seurattiin droonilla kerätyn multispektriaineiston avulla. Myös vedenalaisia kasvustoja pystyttiin havaitsemaan, sillä tutkitun matalan vesistön vesi oli kirkasta. Tutkimusalueen kuvaukseen käytettiin kiintosiipistä SenseFly eBee -dronia, johon oli asennettu Sequoia-multispektrikamera. Multispektrikamera operoi kolmella leveydeltään 40 nm kaistalla, jotka keskittyivät vihreään valoon (550 nm), punaiseen valoon (660 nm) ja NIR-säteilyyn (790 nm), sekä yhdellä 10 nm leveällä punaisen valon rajalle keskittyneellä kaistalla (red-edge 735 nm). Myös RGB-kuvia tuottava kamera oli asennettuna drooniin. Droonin lentokorkeus oli 122 metriä, mikä johti multispektridatan 13 cm:n spatiaaliseen

resoluutioon ja RGB-kuvien 4 cm:n spatiaaliseen resoluutioon. Lentoreitin suuntainen kuvien limittäisyys oli 80 % ja leveyssuuntainen 70 %. RPAS-laitteella hankittu data käsiteltiin fotogrammetrisesti Pix4Dmapper-ohjelmistolla. RGB-kuvista tuotettiin tutkimusalueen kattava ortomosaiikki. Multispektriaineisto orto-oikaistiin ja siitä tuotettiin tutkimusalueen reflektanssia eli havaitun säteilyn intensiteettiä kuvaava kartta jokaiselle havainnoidulle kaistalle (4 kpl). Aineisto segmentoitiin erottamalla vedenpinnan ylä- ja alapuolella kartoitetut kohteet käyttämällä QGIS-paikkatieto-ohjelmistoa sekä ENVI-kuvankäsittelyohjelmistoa. Vedenalaiset kohteet erotettiin muusta aineistosta käyttämällä hyödyksi veden ominaisuutta absorboida tehokkaasti NIR-säteilyä. NIR-säteilyn kaistasta tuotetuissa kuvissa vedenalaiset kohteet näkyivät käytännössä mustina. Vedenpinnan yläpuolisille kohteille määritettiin kasvillisuusindeksi NDVI, joka laskettiin yhtälön (3) mukaisesti käyttämällä hankittua aineistoa punaisen valon ja NIR-säteilyn intensiteeteistä. Kohteiden segmentointiin käytettiin punaisen ja vihreän valon kaistoja sekä NIR-säteilyn kaistaa ja laskettua NDVI:tä. Kasvien tunnistus suoritettiin visuaalisena tulkintana, sillä aiemmin sahalehdistä kerättyä kaukokartoitusaineistoa ei voitu käyttää koneoppimisen koulutusdatana sen riittämättömän resoluution takia. Ortokuvien ja multispektriaineiston visuaalisen tulkinnan tuloksia verrattiin käytetyn satunnaisen metsän (RF) algoritmia hyödyntävään luokitusmenetelmään, joka tehtiin QGIS-paikkatietojärjestelmän sisäisessä Orfeo ToolBox 6.0 -ohjelmistolla. RF-algoritmin on todettu tuottavan parhaita tuloksia kaukokartoitusdatan kohteiden luokittelussa ja sitä on käytetty vesikasvillisuuden tunnistamisessa droonilla otetuista ilmavalokuvista. Automatisoidun sahalehden tunnistuksen tarkkuus oli 89–92 % veden yläpuolisille kohteille ja 74–84 % vedenalaisille kohteille, kun tuloksia verrattiin visuaaliseen tulkintaan.

Chabot et al. toteavat parhaiden kuvausolosuhteiden olevan vähätuulisia ja pilvisiä, jolloin tuuli ei muodosta vedenpinnan väreilyä eikä kirkkaasta auringonpaisteesta aiheudu suoria heijastuksia (glint), jotka voivat aiheuttaa virhettä kerättyyn kaukokartoitusdataan ja vaikeuttaa sen tulkintaa. Vedenalaisten kohteiden tunnistaminen on muutenkin haastavaa niiden syvyysvaihteluista aiheutuvien sävy- ja kontrastierojen takia, ja vedenpinnan aallot, väreet ja heijastukset tekevät tehtävästä entistä haastavamman. Kuvaus suositellaan suoritettavan keskipäivän aikaan ( $\pm 2$  tuntia Auringon zenitistä), jotta vedenalaiset kohteet saavat suurimman mahdollisen valaistuksen. Multispektridatan käyttöä lajintunnistuksessa rajoitti sinisen valon kaistan puuttuminen, sillä käytetty sensori operoi vain punaisen ja vihreän valon kaistoilla. Sininen valo läpäisee vettä punaista ja vihreää valoa tehokkaammin, joten sinisen valon kaistalla operoivia sensoreita suositellaan käytettävän

vedenalaisen kasvillisuuden kartoituksessa. Droonien avulla pystytään kuvaamaan laajojen alueiden kasvillisuutta nopeasti ja korkea spatiaalisen resoluution aineistosta kasvilajien tunnistus onnistuu hyvin. Menetelmän tehokkuuden arvioinnissa on syytä kuitenkin huomioida aineiston käsittelyyn kuluva aika. Chabot et al. hyödynsivät tutkimuksessaan käyttäjäystävällisiä ohjelmistoja, mutta multi- ja hyperspektraalisen aineiston käsittely ja tulkinta vaatii esitietoja kuvattujen kohteiden heijastusominaisuuksista sähkömagneettisen spektrin kaistoilla.

Viljanen et al. (2018) ovat myös tutkimuksessaan käyttäneet koneoppimista kasvillisuuden kartoituksessa. Tutkimuksen tarkoituksena oli nurmisäilörehun biomassan arviointi droonilla otetuista valokuvista fotogrammetrisin menetelmin tuotettujen kasvipeitteen korkeusmallien sekä hyperspektriaineiston avulla. Luonnonvarakeskuksen tutkimusmaatilalla toteutetussa tutkimuksessa kuvattiin Gryphon Dynamics -runkoiseen kustomoituun nelikopteriin asennetulla 36,4 megapikselin Sony A7R -kameralla toisen vuoden nurmipeltoa. Aineiston georeferointiin käytettiin PPK-tekniikkaa. Käytössä oli myös Fabry Pérot -interferometri (FPI) hyperspektrikamera, joka operoi aallonpituusalueella 500–900 nm. FPI-kameraa käytettiin havainnoimaan punaisen valon (669,0 nm) ja NIR-säteilyn (804,1 nm) aallonpituuskaistoja, mikä mahdollisti kasvillisuusindeksien laskennan.

Biomassan määrän arviointia varten tuotetut RGB- ja FPI-ortomosaiikit sekä digitaaliset maastomallit (DTM) luotiin Agisoft Photoscan -fotogrammetriaohjelmistolla. Tuloksia verrattiin biomassan *in situ* -mittauksiin, joissa käytettiin nurmitikkua nurmen korkeuden mittaukseen sekä lautasmittausta. Usean muuttujan lineaarista regressioanalyysia sekä satunnaisen metsän (RF) algoritmia käytettiin aineiston luokituksessa ja biomassan arvioinnissa RPAS-aineistosta. Regressioanalyysissä mallinnettiin riippumattomien muuttujien suhdetta käyttämällä Weka-ohjelmistoa. Biomassan arvioinnissa hyödynnettyjä muuttujia olivat nurmikon korkeus sekä RGB- ja FPI-kameroiden havainnoimat sähkömagneettisen säteilyn kaistat (R, G, B, NIR). Viljanen et al. toteavat, että koneoppimiseen perustuva menetelmä toimii parhaiten, kun siihen on integroitu useita riippumattomia muuttujia yksinkertaisen yhden muuttujan lineaarisen regression sijasta. Sekä kuivasadon että tuoresadon tapauksessa Pearsonin korrelaatiokertoimiksi saatiin 0,98 kun koneoppimisen tuloksia verrattiin *in situ* -mittauksiin. Biomassan arvioinnin parhaat tulokset saavutettiin juuri ennen säilörehun niittoa kerätyistä RPAS-aineistosta. Heikommat tulokset aiheutuivat käytettäessä kasvukauden alussa tuotettua aineistoa, jolloin nurmea oli vähän. Tutkimuksen tulokset ovat maatalouden sovellusten hyödynnettävissä, mutta ne todistavat

useiden muuttujien hyödyn myös muun kasvillisuuden kuten vesikasvillisuuden kartoituksessa.

#### 4.3.6 Maankuivatus ja ojitus

Drooneja voidaan hyödyntää maankuivatushankkeiden suunnittelussa ja hankkeiden etenemisen seurannassa. Toimiva maankuivatus on Suomen olosuhteissa edellytys onnistuneelle kasvinviljelylle. Ojitussuunnittelussa tarvittaviin keskeisiin aineistoihin kuuluvat maanpinnan korkeustiedot, joiden tulee olla mahdollisimman yksityiskohtaisia (Järvenpää & Poutanen 2015, s.46). Lähes jokaisen ojitushankkeen suunnittelu vaatii maastomittauksia, jotka on mahdollista tehdä droonia apuna käyttäen. Ojitushankealueesta voidaan tuottaa yksityiskohtaisia korkeusmalleja laserkeilaamalla tai fotogrammetrisin menetelmin. Kuten muissakin käyttökohteissa, uoman kasvillisuus voi rajoittaa fotogrammetristen menetelmien käyttöä myös ojitusalueiden korkeusmallien tuottamisessa. Peltoalueiden maanpintaa kuvaava korkeusmalli kannattaa siis tuottaa niiton jälkeen otetuista ilmapalokuvista, joissa viljeltävä kasvillisuus on mahdollisimman vähäistä. Kasvillisuuden läpäiseviä sensoreita kuten laserkeilaimia käytettäessä mittausten ajankohta on joustavampi.

Kaivettujen ojien vedenjohtavuutta ja uomien kasvittumista voidaan seurata droonien avulla. Ojia ympäröi usein suojavyöhykkeet, joissa kasvaa sekä ruohokasveja että pensaita ja pajuja. Ojan vedenjohtokyvyn parantamiseksi ja tulvariskin vähentämiseksi ojaa voidaan joutua perkaamaan kasvillisuutta poistamalla. Uomien perkaustarvetta voidaan arvioida droonilla otetuista valokuvista tai ojien vedenkorkeuden arviointiin soveltuvilla sensoreilla. Brinkhoff et al. (2018) ovat käyttäneet drooneja kastelukanavien kasvittumisen arvioinnissa Australiassa. Samoin kuin ojien kasvittuminen, myös kastelukanavien kasvittuminen estää niiden toiminnan pienentämällä uomien vedenjohtokykyä. Brinkhoffin et al. tutkimuksen kohteena olleella Murrumbidgee-kastelualueella viljellään muun muassa riisiä, puuvillaa, sitrushedelmiä sekä viinirypäleitä. Laajuudeltaan alue on kokonaisuudessaan noin 670 000 hehtaaria, josta noin 18% oli kasteltua aluetta vuonna 2017. Alueen kastelukanavien pituus on yhteensä noin 3500 km ja ojien pituus noin 1600 km. Kanavat ovat leveydeltään yleensä alle 10 m ja syvyydeltään alle 1,5 m. Alueen laajuuden takia kanavien kasvittumisen seuranta maastossa ei ole käytännöllistä. Tutkimuksessa on käytetty satelliittihavaintoja sekä MicaSense RedEdge -kameralla varustettua DJI Inspire 1 v2 -nelikopteria kastelukanavien kasvillisuuden kartoituksessa. Kartoitettuihin rikka-

kasveihin kuului muun muassa osmankäämilajeja, vitoja ja vallisnerioita. Droonilla kuvattiin neljää eri kastelukanavaa yhteensä noin neljän kilometrin matkalta. Kuvaukset toistettiin kuusi kertaa rikkakasvien kasvun seurannan mahdollistamiseksi. Droonin lentokorkeuden ollessa 75 m tuotetun aineiston maapikselin koko (GSD) oli 5 cm. Droonikuvaukset suoritettiin kahden tunnin sisällä Auringon zenitistä varjojen minimoimiseksi. Droonikuvauksen tuloksena tuotettiin multispektraalisia ortomosaiikkeja Pix4Dmapper-ohjelmistolla. Ortomosaiikin avulla tutkimusalueen maasto luokiteltiin Google Earth Engine -pilviohjelmistossa kolmeen kategoriaan: vesi, maa ja rikkakasvit. Samaa luokitusmenetelmää käytettiin myös World-View 3 -satelliittikonstellaation tuottaman kaukokartoitusaineiston käsittelyyn. Pan-tarkennetun satelliittiaineiston spatiaalinen resoluutio oli 30 cm. Tarkoituksena oli hyödyntää verrattain pienellä neljä kastelukanavaa käsittävällä tutkimusalueella kokeiltua RPAS-menetelmää laajemman alueen kasvittumisen arvioinnissa ja aineiston luokituksessa. Drooniin asennettu kamera operoi neljällä aallonpituuskaistalla (R, G, B ja NIR), joiden leveys vaihteli välillä 10–40 nm. World-View 3 -aineistosta hyödynnettiin samaan aallonpituusalueeseen keskittyviä kaistoja, mutta kaistojen leveys oli suurempi (40,5–100,4 nm). Sekä RPAS- että satelliittiaineiston luokittelussa kolmeen kategoriaan käytettiin hyväksi spektraalisia indeksejä, joihin kuuluivat muun muassa NDVI, NDWI (Normalized Difference Water Index), NDAVI (Normalized Difference Aquatic Vegetation Index) ja VARI (Visible Atmospherically Resistant Index). Luokittelussa käytettiin sekä ohjattua että ohjaamatonta luokittelua vesi-, maa- ja rikkakasvialueiden erottamiseksi toisistaan. Käytetyn luokittelumenetelmän validoimiseksi luokiteltiin myös manuaalisesti sellaisia aineistoja, joita ei käytetty koneoppimisen koulutusdatana.

RPAS-laitteella hankitun kuvamateriaalin avulla pystyttiin seuraamaan tutkittujen rikkakasvien elinvoimaisuutta sekä muutoksia rikkakasvien määrässä torjuntakeinojen käytön jälkeen. Satelliittiaineiston luokittelun tuloksena saatiin selville myös rikkakasvien levinneisyyden kokonaispinta-ala laajemmalla alueella. Eri ajankohtina tuotettuja aineistoja vertaamalla pystytään myös paikantamaan alueet, joissa rikkakasvit kasvavat nopeasti. Näin rikkakasvien torjuntatoimenpiteet pystytään kohdentamaan spatiaalisesti oikein.

Drooneihin asennetuilla sensoreilla voidaan tuottaa korkean spatiaalisen resoluution dataa, mutta laajojen kanavaverkostojen kuvaamiseen RPAS-laitteella kuluu paljon aikaa. Brinkhoffin et al. tutkimuksessa yhden kilometrin pituisen kanavan kuvaamiseen RPAS-

laitteella kului yksi tunti. Kasvittumisen seuranta vaatii myös kuvamateriaalin tuottamisen useina eri ajankohtina, joten droonilentoihin ja niihin liittyvään logistiikkaan kuluu paljon resursseja. Pitkien uomalinjastojen kartoitukseen voidaan käyttää multikopterien sijasta kiintosiipisiä drooneja, jotka kartoittavat laajoja alueita yhdellä lennolla. Myös BVLOS-lennot voivat sopia VLOS-lentoja paremmin laajojen alueiden kuvaukseen, mutta droonin operointi ilman näköyhteyttä vaatii erillisiä lupamenettelyjä ja erityistä riskienarviointia. Brinkhoffin et al. tutkimus osoittaa RPAS-laitteilla tuotetun datan ja satelliittihavaintojen yhdistämisen hyödyn. Korkean spatiaalisen resoluution RPAS-aineiston käsittelyyn kehitettyä datan spektraalisia ominaisuuksia hyödyntävää luokittelumenetelmää pystyttiin käyttämään myös satelliittiaineiston luokittelussa onnistuneesti. RPAS-laitteilla voidaan myös täydentää temporaalisen resoluution rajoittaman satelliittidatan mahdollisia puutteita korkean spatiaalisen resoluution RPAS-dataa vaativissa tutkimuskohteissa.

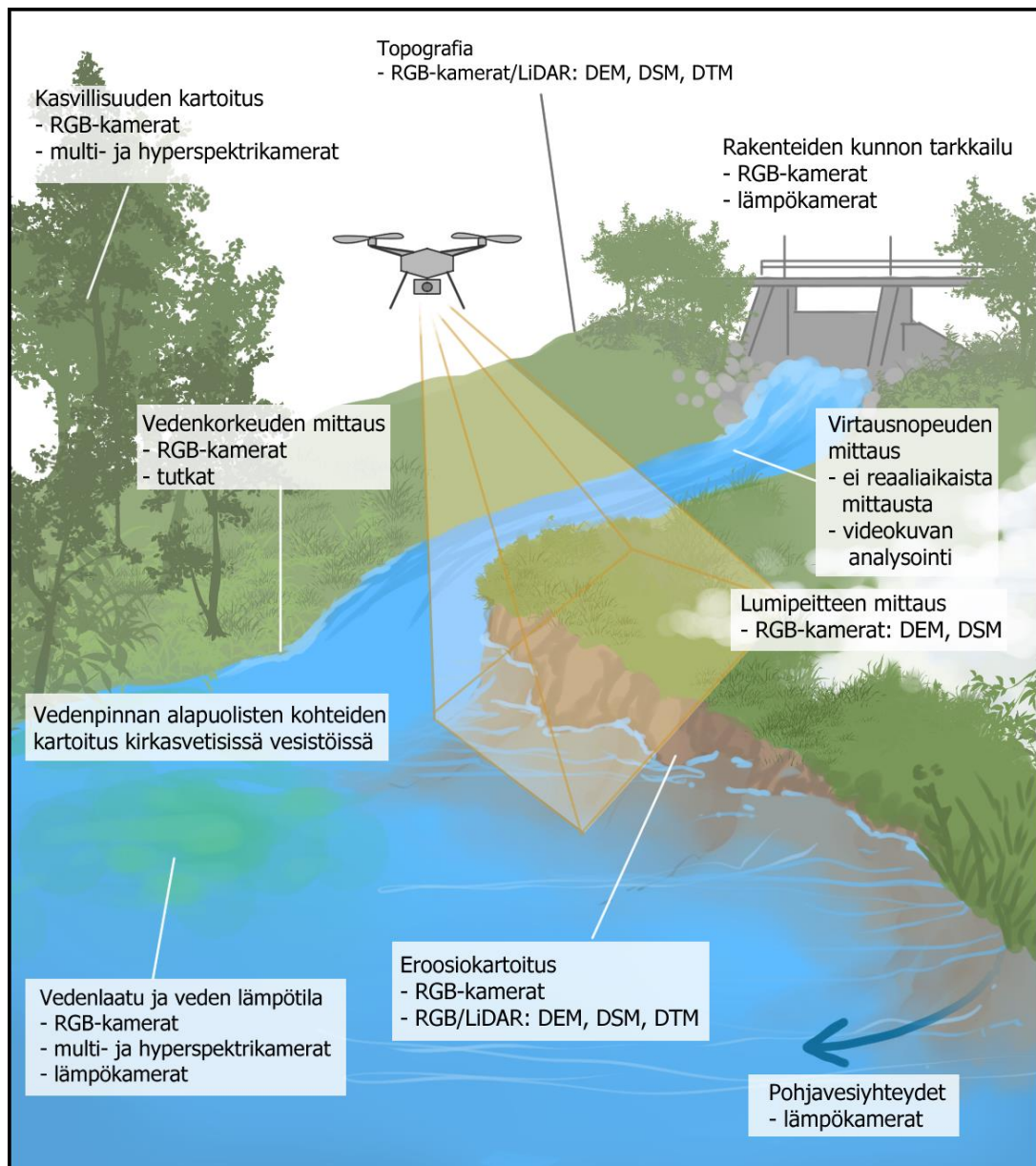
#### **4.4 RPAS-laitteiden käyttömahdollisuuksia kartoittavan kirjallisuuskatsauksen johtopäätökset**

Tässä diplomityössä suoritettussa kirjallisuuskatsauksessa selvisi RPAS-laitteiden yleisimpiä käyttökohteita vesivarojen hallinnan tehtävissä ja tutkimuksessa sekä menetelmiä, jotka vaativat vielä lisätutkimusta ja RPAS-teknologian kehitystä luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Käsiteltyjä julkaisuja on koottu taulukkoon 3 liitteessä 1. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellyt tieteelliset julkaisut valikoituivat niiden tutkimuskohteiden ja aihepiiriin lisäksi niiden julkaisuajankohdan mukaan. Alle viisi vuotta sitten julkaistuja artikkeleita ja tutkimustuloksia suosittiin esiteltävien julkaisujen valinnassa, jotta nykyistä RPAS-teknologiaa voitiin esitellä.

Kuvaan 15 on konseptuaalisesti koottu tässä diplomityössä esiteltyjä RPAS-laitteiden käyttökohteita vesivarattehtävissä. RGB-kamerat soveltuvat useimpiin vedenpinnan yläpuoliseen ympäristön havainnointitehtäviin ja jossain määrin myös vedenalaisten kohteiden kartoitukseen. Suomessa etenkin Etelä-Pohjanmaalla useat vesistöt ovat kuitenkin humuspitoisia ja näkösyvyydeltään heikkoja, mikä rajoittaa etenkin näkyvän valon hyödyntämistä vedenalaisten kohteiden tutkimuksessa. Ilmavalokuvia voidaan visuaalisen tulkinnan lisäksi käyttää maastomittauksissa käsittelemällä ne ensin fotogrammetrisesti esimerkiksi Structure from Motion -tekniikan avulla. SfM-tekniikkaa hyödyntäviä help-

pokäyttöisiä fotogrammetriaohjelmistoja on saatavilla runsaasti ja ne soveltuvat ilmavalokuvien orto-oikaisuun, laajoja alueita kuvaavien ortomosaiikkien luontiin sekä kuvattujen kohteiden 3D-mallinnukseen. Fotogrammetriaohjelmistot tuottavat georeferoiduista ilmavalokuvista automaattisesti digitaalisia pistepilviä, joita voidaan edelleen jalostaa digitaalisiksi korkeus-, pinta- ja maastomalleiksi. Korkeusmalleja voidaan hyödyntää niin tulvariskien arvioinnissa ja hallinnassa kuin maapatojen ja penkereiden korkeusmittauksissa ja muodonmuutosten seurannassa. Fotogrammetriaohjelmistot ovat nykyään pitkälle automatisoituja, eikä käyttäjän tarvitse perehtyä niiden toiminnan mahdollistavien DIM-algoritmien toimintaan saadakseen tuotettua mittatarkkoja korkeusmalleja georeferoiduista ilmavalokuvista. Korkean spatiaalisen resoluution ilmavalokuvien prosessointi vaatii kuitenkin käytetyltä tietokoneelta riittävästi laskentatehoa, etenkin jos mallinnettava kohde on pinta-alaltaan suuri ja käsiteltäviä ilmavalokuvia on useita satoja. Suurten kohteiden tiheiden digitaalisten pistepilvien ja 3D-mallien tuottaminen on aikaa vievää, vaikka aineisto pystytään keräämään droonilla nopeasti.





Kuva 15 RPAS-laitteiden käyttömahdollisuudet vesivarattehtävissä

Maastokohteiden tai vesistörakenteiden digitaalisia pistepilviä ja korkeusmalleja voidaan tuottaa myös drooniin asennetulla laserkeilaimella (LiDAR) hankitusta aineistosta. Laserkeilaimen lähettämät laserpulssit läpäisevät myös kasvillisuutta, joten maastonmuodot voidaan kartoittaa myös kasvipeitteen alta. Laserkeilausta voidaan jossain määrin hyödyntää myös vedenkorkeuden mittauksessa droonin avulla, mutta menetelmää rajoittaa laserpulssien absorboituminen veteen.

Veden heijastusominaisuudet hankaloittavat useiden kaukokartoitusmenetelmien käyttöä vedenalaisten kohteiden tutkimuksessa. Toisaalta vedenpinnan lähettämää säteilyä voidaan käyttää vedenlaadun mittauksessa. Drooniin asennetuilla multi- ja hyperspektrisensovereilla voidaan mitata esimerkiksi veden klorofyllipitoisuutta, jota käytetään levätilanteen seurannassa ja vesistön rehevöitymisen arvioinnissa. Useita eri sähkömagneettisen säteilyn kaistoja havainnoivia multi- ja hyperspektrikameroita käytetään myös kasvillisuuden kartoituksessa. Multi- ja hyperspektriaineiston tulkinnan helpottamiseksi on kehitetty liuta erilaisia spektraalisia indeksejä, joilla voidaan arvioida esimerkiksi kasvillisuuden määrää.

Vesistön vedenlaadun mittaamisessa multikoptereita voidaan hyödyntää vesinäytteenotossa. Multikopteriin voidaan asentaa Limnos-tyyppinen noudin, jolloin vesinäytteenotto onnistuu vesistön rannalta droonia ja sen näytteenottojärjestelmää pilotoimalla. Drooniin voidaan myös kiinnittää erilaisia veden laatua ja lämpötilaa mittaavia antureita, jotka voidaan laskea vaijerilla vesipatsaan eri syvyyksiin multikopterin leijuessa vedenpinnan yllä. Pintaveden lämpötilaa voidaan mitata drooniin asennetulla lämpökameralla. Lämpökameralla on mahdollista myös havaita ja paikantaa pintaveden ja pohjaveden yhteydet.

Vaikka RPAS-laitteita voidaan hyödyntää useissa eri vesivarojen hallintaan ja tutkimukseen liittyvissä tehtävissä, on niiden käytön rajoitukset huomioitava ja niiden mahdollistama hyöty arvioitava. RPAS-laitteiden käytöllä saatava hyöty on tapauskohtaista tutkimuskohteesta riippuen. Niillä voidaan saada lisähyötyä vaikeakulkuisessa maastossa sijaitsevien kohteiden tutkimuksessa, jossa perinteiset maastomittaukset ovat aikaa vieviä tai vaarallisia toteuttaa. RPAS-laitteita hyödyntävien kaukokartoitusmenetelmien etuihin vesistöjen kartoituksessa ja hydrologisten prosessien tutkimuksessa kuuluu mittausten kontaktittomuus, mikä voi parantaa mittausten laatua sekä työturvallisuutta. Kontaktiton mittaus ei myöskään häiritse mitattavaa kohdetta, kuten sortumisvaarassa olevaa jokirantaa.

Useita vesivaratehtäviin liittyviä maastossa tehtäviä mittauksia ei vielä voida korvata tämän diplomityön kirjoittamisen aikaisella RPAS-tekniikalla. Esimerkiksi lumen vesiarvon määrittämiseen tarvittavaa lumen tiheyden määrittämiseksi ei ole kehitetty sopivaa etämittausten menetelmää. Veden virtausnopeutta voidaan arvioida analysoimalla droonilla

tuotettua videokuvaa erilaisilla PIV-algoritmeilla, mutta vain virtausnopeus veden pinnalla voidaan havaita. Reaaliaikaista virtausnopeutta mittaavan RPAS-laitteeseen asennetun sensorin käyttöä käsitteleviä tutkimuksia tai julkaisuja ei tässä kirjallisuuskatsauksessa tullut esiin. Ultraäänitutkien käyttöä RPAS-laitteessa voidaan tulevaisuudessa tutkia, mutta droonien soveltuvuutta herkkien mittalaitteiden alustana rajoittaa niiden värinä ja täysin paikallaan leijumisen epävarmuus. Esimerkiksi tuulenpuuska voi helposti heilauttaa multikopteria ja sen liike muuttuu epävakaaksi, kunnes se palautuu tasapainoasemaansa.

RPAS-laitteilla tehtäviin mittauksiin vaikuttavia virhelähteitä on tuulen lisäksi muut sääolosuhteet kuten ilman kosteus sekä käytetyn järjestelmän toimintavirheet. Droonien paikannukseen käytetyt satelliittipaikannusjärjestelmät voivat häiriintyä ympäristön esteiden kuten tiheän metsän tai korkeiden rakennusten takia. Tietty RPAS-laitteiden hyötykuormassa käytettävät sensorit vaativat toimiakseen optimiolosuhteet, jotka ovat vain harvoin saavutettavissa kokonaisjärjestelmän ulkoisista tekijöistä johtuen. Useita mittauksia tulisi tehdä pitkällä aikavälillä, jotta mittauksien keskiarvo voidaan selvittää. Droonien lentoaika on kuitenkin rajallinen käytetystä tehonlähteestä riippuen, ja yleensä drooneilla tehtävät mittaukset ovat yksittäisiä otoksia eivätkä jatkuvia mittauksia.

Nykyisissä RPAS-laitteita hyödyntävissä mittausmenetelmissä on siis runsaasti virhelähteitä. Useiden sensorien käyttösovellukset on tarkasti määritelty niiden toimintaperiaatteiden ja rajoitteiden mukaan. Useita käyttötarkoituksia varten on siis hankittava vain kyseiseen tarkoitukseen sopiva sensori ja sen tuottaman aineiston käsittelyä varten tarvittavat lisälaitteet ja ohjelmistot. Esimerkiksi kasvillisuuden kartoitus monikaistakuvauksen keinoin vaatii hyperspektrikameran sekä hyperspektraalisen aineiston käsittelyä varten soveltuvan ohjelmiston sekä perehtymistä kasvipeitteen heijastusominaisuuksiin.

## 5 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä esiteltiin erilaisten kauko-ohjattavien ilma-alusjärjestelmien hyödyntämismahdollisuuksia vesivarojen hallintaan, käyttöön ja hoitoon liittyvissä tehtävissä. Käsitellyt droonien hyödyntämissovellukset keskittyivät vesistörakenteiden tarkkailuun, vesiympäristön seurantaan, järvien ja virtavesien tutkimukseen sekä ranta-alueiden kartoitustehtäviin. RPAS-laitteiden käyttömahdollisuudet vesivaratehtävissä sekä esiteltujen tekniikoiden rajoitukset on koottu taulukkoon 2. Selvityksessä käsiteltiin vain murto-osaa nykypäivän RPAS-tekniikan käyttömahdollisuuksista diplomityön laajuuden puitteissa. Työssä ei esimerkiksi käsitelty kauko-ohjattavien veneiden ja sukellusveneidä hyödyntämistä vedenalaisessa tutkimuksessa. Selvitys rajattiin Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen vesistöyksikön tehtävien mukaan ja kirjallisuuskatsauksessa esitellyt julkaisut valittiin niin, että niiden tuloksia voidaan hyödyntää ELY-keskuksen vesistöyksin tehtävissä sekä RPAS-toiminnan suunnittelussa ja kehittämisessä. Kirjallisuuskatsauksessa kiinnitettiin huomiota myös nykyisten menetelmien tarkkuuteen ja virhelähteisiin. Hankitun aineiston georeferoinnin tärkeys huomioitiin lentojen suunnittelussa ja toteutuksessa sekä aineiston käsittelyssä, sillä huolellinen georeferointi mahdollistaa vesistörakenteiden tarkkailussa ja tulvariskikartoituksessa käytettyjen mittatarkkojen korkeusmallien tuottamisen ja eri ajankohtina tuotettujen aineistojen vertailun.

Taulukko 2 RPAS-tekniikoiden käyttömahdollisuudet vesivaratehtävissä

Sovelluskohde	Hyödynnettävissä olevat RPAS-tekniikat		Tekniikan rajoitukset
	Sensorit ja muut laitteet	Menetelmät	
Vesistörakenteiden tarkkailu	Valokuvaus & fotogrammetriset menetelmät	Visuaalinen tarkkailu, korkeusmallit	Esimerkiksi penkereiden kasvi- tai lumipeite estää maanpinnan mallinnusta
	Laserkeilaus (LiDAR)	Tiheät pistepilvet, korkeusmallit	
	Lämpökuvaus	Betonirakenteiden kunnon tarkkailu	Lämpökameran erotuskyky
Vedenkorkeuden mittaust	Tutkat	Vedenpinnan havaitseminen ja etäisyyden mittaust	Sensorin epätarkkuus, multikopterin epävakau
	Laserkeilaus (LiDAR)	Vedenpinnan havaitseminen ja etäisyyden mittaust	Käytetyn laserpulssin heikko heijastuminen veden pinnalta
	Valokuvaus	Reunantunnistusalgoritmit vedenpinnan havaitsemisessa, vesirajan havaitseminen fotogrammetriakuvauksella	Fotogrammetriset menetelmät eivät sovellu vedenpinnan mallinukseen

Virtaaman mittaus	Videokuva	Videokuvan analysointi esimerkiksi PIV- tai PTV-tekniikalla	Merkkiaineen (tracer) puutuminen, droonin epävakaudesta aiheutuva videokuvan värinä
Lumipeitteen mittaus	Valokuvaus ja fotogrammetriset menetelmät	Lumipeitettä kuvaavat digitaaliset pintamallit	Lumipeitteen suuri heijastavuus ja kontrastivaihteluiden puute rajoittaa fotogrammetrian käyttöä
Veden lämpötilan mittaus	Lämpökuvaus	Pintaveden lämpötila, pohjavesiyhteydet	Lämpökameran erotuskyky
Tulvatilanteen seuranta	Valokuvaus, videokuva	Tulvan levinneisyyden kartointi	
Tulvariskien hallinta	Valokuvaus & fotogrammetriset menetelmät	Tulvariskialueen digitaaliset korkeusmallit	Vesistön rannan kasvipeite rajoittaa fotogrammetristen menetelmien käyttöä rannan maanpinnan mallinuksessa
	Laserkeilaus (LiDAR)	Tulvariskialueen digitaaliset korkeusmallit	
Kunnostuskohteiden seuranta	Valokuvaus	Kunnostushankkeiden seuranta, luontokohteiden inventointi	
Eroosiokartoitus	Valokuvaus & fotogrammetriset menetelmät	Digitaaliset korkeus- ja pintamallit	Kasvipeite rajoittaa fotogrammetristen menetelmien käyttöä maanpinnan mallinuksessa
	Laserkeilaus (LiDAR)	Digitaaliset korkeus- ja pintamallit	
Vedenlaadun seuranta	Valokuvaus	Levätilanteen visuaalinen seuranta	
	Multi- ja hyperspektrikuvaus	Veden klorofyllipitoisuus	Sensorin spektraalinen ja spatiaalinen resoluutio
	Vesinäytteenotto	Vesinäytteenotto tai vedenlaatuanturin käyttö	Menetelmä ei ole vakiintunut
Kasvillisuuden kartoitus	Valokuvaus ja fotogrammetriset menetelmät	Kasvipeitteen mallinnus, lajien tunnistus, määrän arviointi	Visuaalinen tulkinta vaatii paljon resursseja, tekoälyn hyödyntäminen lajien tunnistuksessa vaatii tulosten validointia
	Multi- ja hyperspektrikuvaus	Kasvillisuuden luokittelu, tunnistus	Sensorin spektraalinen ja spatiaalinen resoluutio
	Laserkeilaus (LiDAR)	Kasvillisuuden korkeus, latvusto	
Maankuivatus ja ojitus	Valokuvaus ja fotogrammetriset menetelmät	Korkeusmallit	Kasvipeite rajoittaa fotogrammetristen menetelmien käyttöä maanpinnan mallinuksessa
	Laserkeilaus (LiDAR)	Tiheät pistepilvet, korkeusmallit	

Useiden RPAS-laitteita hyödyntävien menetelmien käytön validointi ja standardointi vaativat vielä tutkimus- ja kehitystyötä. Jokaista tässä selvityksessä käsiteltyä käyttösovellusta ja RPAS-tekniikkaa voidaan tutkia laajemmin. Lisätutkimuksia voidaan kohdentaa

esimerkiksi virtausnopeuden reaaliaikaiseen mittaukseen soveltuvan tekniikan kehitykseen, mikä helpottaisi esimerkiksi tulvivan joen virtaaman mittausta. RPAS-tekniikoiden kehityksessä on huomioitava sensoreiden ja mittalaitteiden käyttövaatimukset. Multikopteri ei välttämättä sovellu värinänsä takia herkkien mittalaitteiden kuten dopplertutkien alustaksi. Uusia sensoreita ja mittalaitteita kehitetään kuitenkin jatkuvasti RPAS-laitteiden kanssa yhteensopiviksi, ja lähitulevaisuudessa ilmenee yhä uusia RPAS-laitteiden käyttösovelluksia.

RPAS-tekniikoiden kehittyessä ja menetelmien vakiintuessa aineistoa voidaan hankkia entistä tehokkaammin. Aineistoa kertyessä suuria määriä datan käsittely voi kuitenkin muodostua ongelmalliseksi. Aineiston tehokas käsittely esimerkiksi koneoppimista hyödyntämällä vaatii vielä kehitystä luotettavien tulosten saamiseksi. Uusia RPAS-aineistojen käsittelyyn soveltuvia ohjelmistoja kehitetään jatkuvasti menetelmien yleistyessä ja vakiintuessa. Tänä päivänä RPAS-menetelmien hyödyntämisessä korostuu drooniteknologian uutuus ja menetelmien kokeellisuus, sillä uusien tutkimustulosten validointi on vielä haastavaa vertailukohtien puuttuessa. Myös tiedonsiirto ja tuotetun aineiston varastointi on huomioitava RPAS-toiminnan kehityksessä. Tulevaisuudessa 5G-yhteydet nopeuttavat tiedonsiirtoa ja 5G:tä voidaan hyödyntää myös droonien ohjauksessa (Uusiteknologia.fi 2020).

Nykypäivän RPAS-laitteet soveltuvat hyvin ympäristön nopeiden ja paikallisten muutosten kuten tulvatilanteiden tai jokirantojen eroosioprosessien havainnointiin, sillä droonien käyttö on joustavaa ja niitä voidaan lennättää aina sääolosuhteiden salliessa. RPAS-laitteiden käytön hyöty korostuu joustavuuden ohella niiden mahdollistamien uusien näkökulmien tarkastelussa. Korkean spatiaalisen resoluution ortokuvamosaiikeista voidaan tarkastella laajoja alueita yhdellä silmäyksellä. Esimerkiksi tulvivan uoman tukkeutumisen syyksi voi droonilla otetuissa ilmakuvissa paljastua majavan rakentama pato. Droonilla tehdyssä kuvauksessa luonnonympäristöä ei tarvitse häiritä eikä vaikeakulkuisessa maastossa tarvitse käydä jalan. Vaikka droonikuvaukseen kuluu maastossa paikan päällä vain murto-osa perinteisiin maastotutkimuksiin kuluva ajasta, vaatii hankitun aineiston jälkikäsittely aikaa ja muita resursseja helposti tulkittavan ja hyödynnettävän lopputuloksen tuottamiseksi.

## LÄHDELUETTELO

- Ala-aho, P., Rossi, P. M., Isokangas, E. & Kløve, B., 2015. Fully integrated surface–subsurface flow modelling of groundwater–lake interaction in an esker aquifer: Model verification with stable isotopes and airborne thermal imaging. *Journal of Hydrology*, 2015 (522), S.391–406.
- Audronis, T., 2014. *Building Multicopter Video Drones*. Birmingham: Packt Publishing. 155 s. ISBN 978-1-78217-543-8
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B.B., Saravanan, T., Philip, J. & Jayakumar, T., 2013. Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 2013 (60), S.35–55.
- Bakula, K., Ostrowski, W., Szender, M., Plutecki, W., Salach A. & Górski, K., 2016. Possibilities for Using LIDAR and Photogrammetric Data Obtained with An Unmanned Aerial Vehicle for Levee Monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016 (XLI-B1), S.773–780.
- Bandini, F., Jakobsen, J., Olesen, D., Reyna-Gutierrez, J.A. & Bauer-Gottwein, P., 2017. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Hydrology*, 2017 (584), S.237–250.
- Bandini, F., Olesen, D., Jakobsen, J., Kittel, C.M.M., Wang, S., Garcia, M. & Bauer-Gottwein, P., 2018. Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, S.4165–4181.
- Bandini, F., Sunding, T. P., Linde, J., Smith, O., Jensen, I. K., Köppl, C. J., Butts, M. & Bauer-Gottwein, P., 2020. Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: Comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques. *Remote Sensing of Environment*, 2020 (237).
- Bolognesi, M., Farina, G., Alvisi, S., Franchini, M., Pellegrinelli, A. & Russo, P., 2017. Measurement of surface velocity in open channels using a lightweight remotely piloted aircraft system. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8 (1), S.73–86.

- Brinkhoff, J., Hornbuckle, J. & Barton, J. L., 2018. Assessment of Aquatic Weed in Irrigation Channels Using UAV and Satellite Imagery. *Water*, 2018 (10).
- Bristeau, P., Callou, F., Vissière, D. & Petit, N., 2011. The Navigation and Control technology inside the AR.Drone micro UAV. *Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control*, 2011, S.1477–1484.
- Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L. & Lu, P., 2017. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 2017 (4).
- Chabot, D., Dillon, C., Shemrock, A., Weissflog, N. & Sager, E. P. S., 2018. An Object-Based Image Analysis Workflow for Monitoring Shallow-Water Aquatic Vegetation in Multispectral Drone Imagery. *International Journal of Geo-Information*, 2018 (7).
- Chapman, A., 2020. Types of Drones: Multi-Rotor vs Fixed-Wing vs Single Rotor vs Hybrid VTOL [verkkodokumentti]. Melbourne: AUAV. Saatavissa: <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/> [viitattu 27.1.2020].
- Chirayath, V. & Earle, S.A., 2016. Drones that see through waves – preliminary results from airborne fluid lensing for centimetre-scale aquatic conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26 (2), S.237–250.
- Chung, M., Detweiler, C., Hamilton, M., Higgins, J., Ore, J. & Thompson, S., 2015. Obtaining the Thermal Structure of Lakes from the Air. *Water*, 2015 (7), S.6467–6482.
- Cimoli, E., Marcer, M., Vandecrux, B., Bøggild, C. E., Williams, G. & Simonsen, S. B., 2017. Application of Low-Cost UASs and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic. *Remote Sensing*, 2017 (9).
- Colomina, I. & Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014 (92), S.79–97.



Deems, J.S., Painter, T.H. & Finnegan, D.C., 2013. Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59 (215), S.467–479.

Dietrich, J.T., 2017. Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017 (42), S.355–364.

DJI, 2018. Phantom 4 RTK User Manual v1.4 [verkkodokumentti]. Shenzhen: DJI. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/phantom-4-rtk/info#downloads> [viitattu 15.2.2020].

D’Onfro, J., 2019. Amazon’s New Delivery Drone Will Start Shipping Packages ‘In A Matter Of Months’ [verkkodokumentti]. New York: Forbes Media LLC. Saatavissa: <https://www.forbes.com/sites/jilliandonfro/2019/06/05/amazon-new-delivery-drone-re-mars-warehouse-robots-alexa-prediction/> [viitattu 27.1.2020].

DroneRules.eu, 2018. Yksityisyyden suoja/tietosuoja ammattilaiselle [verkkodokumentti]. Euroopan komissio. Saatavissa: <https://dronerules.eu/fi/professional/obligations/summary-of-privacy-rules-in-eu> [viitattu 15.2.2020].

EASA, 2019. European Union Aviation Safety Agency. EU wide rules on drones published. Köln: EASA. Julkaistu: 11.6.2019. Saatavissa: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/press-releases/eu-wide-rules-drones-published> [viitattu 27.11.2019]

Grayson, B., Penna, N.T., Mills, J.P & Grant, D.S., 2018. GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 2018.

Guimarães, T. T., Veronez, M. R., Koste, E. C., Gonzaga Jr., L., Bordin, F., Inocencio, L. C., Larocca, A. P. C., de Oliveira, M. Z., Vitti, D. C., Mauad, F. F., 2017. An Alternative Method of Spatial Autocorrelation for Chlorophyll Detection in Water Bodies Using Remote Sensing. *Sustainability*, 2017 (9).

Harder, P., Schirmer, M., Pomeroy, J. & Helgason, W., 2016. Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle. *The Cryosphere*, 2016 (10), S.2559–2571.

Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H. & De Jong, S. M., 2018. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018 (73), S.428–437.

Honkavaara, E., Hakala, T. & Nevalainen, O., 2018. Ilma-alus kohteen mukaan. *Positio*, 2018 (1), S.8–11.

Husson, E., Hagner, O. & Ecke, F., 2014. Unmanned aircraft systems help to map aquatic vegetation. *Applied Vegetation Science*, 2014 (17), S.567–577.

Jenssen, R. O. R., Eckerstorfer, M. & Jacobsen, S., 2020. Drone-Mounted Ultrawide-band Radar for Retrieval of Snowpack Properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020 (69).

Jones, H.G. & Vaughan, R.A., 2010. Remote sensing of vegetation. Oxford: Oxford University Press. 353 s. ISBN 978-0-19-920779-4

Kansallinen maastotietokanta (KMTK) -ohjelma, 2016. Maastotiedon laatukäsikirjat. Korkeusmallien laatukäsikirja. Helsinki: Maanmittauslaitos. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/maastotiedon-laatukasikirjat> [viitattu 10.2.2020].

Koparan, C., Koc, A., Privette, C., Sawyer, C. & Sharp, J., 2018. Evaluation of a UAV-Assisted Autonomous Water Sampling. *Water*, 2018, 10 (5).

Korhonen, J. 2007. Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 120 s. ISBN 978-952-11-2935-3

Koutalakis, P., Tzoraki, O. & Zaimes, G., 2019. UAVs for Hydrologic Scopes: Application of a Low-Cost UAV to Estimate Surface Water Velocity by Using Three Different Image-Based Methods. *Drones* 2019, 3 (1).

Laine, S., Hoffren, J. & Renko, K., 2006. Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy, 434 s. ISBN 951-0-31376-9

Langhammer, J., Bernsteinová, J. & Mirijovský, J., 2017. Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring. *Water*, 2017 (9).

Li, C. & Ling, H., 2015. Synthetic aperture radar imaging using a small consumer drone. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2015*, S.685–686.

Lim, H., Park, J., Lee, D. & Kim, H. J., 2012. Build Your Own Quadrotor. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), S.33–45.

Long, B., 2013. *Complete Digital Photography*. Seventh Edition. Boston: Course Technology, a part of Cengage Learning, 613 s. ISBN 978-1-285-07726-0

Luppichini, M., Favalli, M., Isola, I., Nannipieri, L., Giannecchini, R. & Bini, M., 2019. Influence of Topographic Resolution and Accuracy on Hydraulic Channel Flow Simulations: Case Study of the Versilia River (Italy). *Remote Sensing*, 2019 (11).

Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M. & Pfeifer, N., 2013. Analyzing Near Water Surface Penetration in Laser bathymetry – A Case Study at the River Pielach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2013 (II-5/W2)* S.175–180.

Mandlbürger, G., Lehner, H. & Pfeifer, N., 2019. A Comparison of Single Photon and Full Waveform Lidar. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019 (IV-2/W5), S.397–404.

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F., García-Ferrer, A. & Pérez-Porras, F., 2018. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72 (2018) S.1–10.

Michez, A., Piégay, H., Jonathan, L., Claessens, H. & Lejeune, P., 2016. Mapping of riparian invasive species with supervised classification of Unmanned Aerial System (UAS) imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016 (44), S.88–94.

Niedzielski, T., Szymanowski, M., Miziński, B., Spallek, W., Witek-Kasprzak, M., Śłopek, J., Kasprzak, M., Błaś, M., Sobik, M., Jancewicz, K., Borowicz, D., Remisz, J., Modzel, P., Męcina, K. & Leszczyński, L., 2019. Estimating snow water equivalent using unmanned aerial vehicles for determining snow-melt runoff. *Journal of Hydrology*, 578.

OTT HydroMet, 2019. OTT SVR 100. Surface Velocity Radar for Measuring Open Channel Flow [verkkodokumentti]. Kempten: OTT HydroMet. Saatavissa: <https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-svr-100-2406/> [viitattu 19.2.2020].

Papa, U., Del Core, G. & Picariello, F., 2016. Atmosphere Effects on Sonar Sensor Model for UAS Applications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 31 (6), S.34–40.

Pix4D, 2020. How to verify that there is enough overlap between the images [verkkodokumentti]. Prilly: Pix4D S.A. Saatavissa: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203756125-How-to-verify-that-there-is-enough-overlap-between-the-images> [viitattu 16.2.2020].

Poutanen, M., 2016. Satelliittipaikannus. Tallinna: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa<sup>®</sup> ry, 351 s. ISBN 978-952-5985-41-2

Pudas, E. & Siiro, P., 2016. E-luokan pohjavesialueet – E-luokan pohjavesialueiden luokittelun tukeminen ja luokitteluohjeen testaaminen. Hämeenlinna: Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 28 s. ISBN 978-952-314-508-5

Rhee, D. S., Kim, Y. D., Kang, B. & Kim, D., 2018. Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Fluvial Remote Sensing: An Overview of Recent Achievements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018 (22), S.588–602.

Ridolfi, E. & Manciola, P., 2018. Water Level Measurements from Drones: A Pilot Case Study at a Dam Site. *Water*, 2018 (10).

- Rossi, P. M., Korkka-Niemi, K., Rautio, A., Jyväsjärvi, J., Isokangas, E., Jaros, A. & Kløve, B., 2017. Remote thermal infrared imaging as an identifier for groundwater dependent ecosystems of esker aquifers in Northern boreal region. *Geophysical Research Abstracts*, 2017 (19).
- Salach, A., Bakula, K., Pilarska, M., Ostrowski, W., Górski, K. & Kureczynski, Z., 2018. Accuracy Assessment of Point Clouds from LiDAR and Dense Image Matching Acquired Using the UAV Platform for DTM Creation. *International Journal of Geo-Information*, 7 (9): 342.
- Sarvilinna, A. & Sammalkorpi, I., 2010. Rehevöityneen järven kunnostus ja hoito. *Ympäristöopas-julkaisusarja*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 64 s. ISBN 978-952-11-3723-5
- Shang, S., Lee, Z., Lin, G., Hu, C., Shi, L., Zhang, Y, Li, X., Wu, J. & Yan, J., 2017. Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV. *Remote Sensing of Environment*, 2017 (198), S.85–94.
- Suomen ympäristökeskus, 2019a. Hydrologisen seurannan kenttätöiden toimintakäsikirja [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus SYKE. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat\\_ja\\_tilastot/Hydrologiset\\_havainnot](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Hydrologiset_havainnot) [viitattu 9.2.2020].
- Suomen ympäristökeskus, 2019b. Kaivosvesiä vastaanottavien vesistöjen hallinta ja kunnostaminen (KaiHali) [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus SYKE. Saatavissa: <https://www.syke.fi/hankkeet/kaihali> [viitattu 14.2.2020].
- Suomen ympäristökeskus, 2019c. Tekoäly ja IoT- vesiriskien ja vesivarojen hallinnassa (ÄlyVesi) [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus SYKE. Saatavissa: <https://www.syke.fi/hankkeet/alyvesi> [viitattu 15.2.2020].
- Tanskanen, J., 2019. Rajavartioston uusi valvova silmä asuu peräkärryssä Venäjän rajalla – pian se näyttää, ylittääkö rajan salaa ihminen vai hirvi [verkkodokumentti]. Helsinki: Yleisradio. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10985618> [viitattu 18.2.2020].

Tauro, F., Petroselli, A. & Arcangeletti, E., 2016. Assessment of drone-based surface flow observations. *Hydrological Processes* 2016 (30), S.1114–1130.

Tiirikainen, V., 2019. Kotipihan lennättäjät ja drooniharrastajat ruotuun – robottilennoikin käytöstä tulee laitonta ilman verkkokurssia [verkkodokumentti]. Helsinki: Yleisradio. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10851402> [viitattu 19.11.2019].

Traficom, 2018. Usein kysyttyä [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: [https://www.droneinfo.fi/fi/usein\\_kysyttya/ilmailu\\_-\\_miehittamattomat\\_ilma-alukset\\_ja\\_lennokit](https://www.droneinfo.fi/fi/usein_kysyttya/ilmailu_-_miehittamattomat_ilma-alukset_ja_lennokit) [viitattu 13.11.2019].

Traficom, 2019a. Koko EU:n kattavat drone-asetukset on julkistettu [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/koko-eun-kattavat-drone-asetukset-julkistettu> [viitattu 12.11.2019].

Traficom, 2019b. RPAS Lentotyötoiminta [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: [https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyo/rpas\\_lentotyo](https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyo/rpas_lentotyo) [viitattu 10.10.2019].

Traficom, 2020. Drone-infotilaisuus 30.1.2020 [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/tilastot-ja-julkaisut/tilaisuudet/drone-infotilaisuus-3012020> [viitattu 30.1.2020].

Uusiteknologia.fi, 2020. Droneja voidaan ohjata matkapuhelinverkon kautta [verkkodokumentti]. Espoo: Teknologiamediat Oy. Saatavissa: <https://www.uusiteknologia.fi/2020/01/14/droneja-voidaan-ohjata-matkapuhelinverkon-kautta/> [viitattu 30.1.2020].

Vesi.fi, 2020. Talvinen hyydetulva [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.vesi.fi/vesitieto/talvinen-hyydetulva/> [viitattu 3.3.2020].

Viljanen, N., Honkavaara, E., Näsi, R., Hakala, T., Niemeläinen, O. & Kaivosoja, J., 2018. A Novel Machine Learning Method for Estimating Biomass of Grass Swards Using a Photogrammetric Canopy Height Model, Images and Vegetation Indices Captured by a Drone. *Agriculture*, 2018 (8).

Wang, X. & Xie, H., 2018. A Review on Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources and Flood Risk Management. *Water*, 2018 (10).

Watts, A.C., Ambrosia, V.G. & Hinkley, E.A., 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing* 2012 (4), S.1671–1692.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. & Reynolds, J.M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 (2012), S.300–314.

Woodget, A.S., Carbonneau, P.E., Visser, F. & Maddock, I.P., 2015. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015 (40), S.47–64.

Wu, K., Rodriguez, G. A., Zajc, M., Jacquemin, E., Clément, M., De Coster, A. & Lambot, S., 2019. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. *Remote Sensing of Environment*, 2019 (235).

Young, H. D. & Freedman, R. A., 2012. *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics* 13<sup>th</sup> Edition. 13<sup>th</sup> edition. San Francisco: Pearson Education Inc., 1521 s. ISBN: 978-0-321-76218-4

## Liite 1. RPAS-laitteiden käyttöä vesivaratehtävissä käsittelevät julkaisut

Taulukko 3 RPAS-laitteiden käyttöä käsitteleviä julkaisuja

Tekijät	Tutkimuskohde	Käytetyt RPAS-laitteet	Tutkimuksen tulokset
Bakula et al. 2016	Tulvapengerten laserkeilaaminen ja korkeusmallien tuottaminen	Hawk Moth -nelikopteri ja sen hyötykuormana YellowScan Mapper -laserkeilain	RPAS-laitetta käyttämällä pystyttiin tuottamaan digitaalisia korkeusmalleja tarkastelluista penkereistä alle 10 cm tarkkuudella.
Bandini et al. 2017	Drooniin asennettujen anturien (tutka, kaikuluotaus ja CLDS-sensori) soveltuvuus vedenkorkeuden mittaukseen	Heksakopteri varustettuna ARS 30X -tutkalla, MB7386-kaikuluotaimella ja CLDS-sensorilla	Vedenkorkeus voidaan määrittää vähentämällä lentokorkeudesta droonin ja vedenpinnan mitattu etäisyys. Tutkimuksessa testatuista sensoreista tutka soveltui parhaiten etäisyyden mittaukseen.
Bandini et al. 2018	Järven ja joen vedenkorkeuksien määrittäminen droonilla vedetyllä kelluvalla kaikuluotaimella	DJI Spreading Wings S900 -heksakopteri varustettuna Sony RX-100 -kameralla ja ARS 30X -tutkalla sekä Deeper Smart Sensor PRO+ -kaikuluotain	Droonilla liikutettiin veden pinnalla kelluvaa kaikuluotainta, jolla pystyttiin havaitsemaan vedenalaiset kohteet 35 metriin asti.
Brinkhoff et al. 2018	Maatalousalueen kastelukanavien kasvitumisen seuranta droonilla hankitun multispektraalisen aineiston sekä satelliittihavaintojen avulla	DJI Inspire 1 v2 -nelikopteri varustettuna MicaSense RedEdge -kameralla (RGB ja NIR)	RPAS-laitteella tuotetuista multispektraalisista ortokuvista pystyttiin spektri-indekseihin perustuvan luokittelumenetelmän avulla erottamaan rikkakasvit, joiden kokonaispinta-ala määritettiin ja kasvua seurattiin.
Casagli et al. 2018	Maanvyörymien havaitseminen digitaalisia maastomalleja (DTM) vertailemalla	Kustomoitu Saturn-multikopteri varustettuna digitaalikameralla	Droonilla otetuista valokuvista tuotettuja korkeusmalleja vertaamalla voidaan havaita muutokset maanpinnan muodoissa.
Chabot et al. 2018	Vieraslajikasvin kartoitus	Kiintosiipinen SenseFly eBee-drooni varustettuna Sequoia-multispektrikameralla (G, R, NIR ja red-edge)	Vedenpinnan ylä- ja alapuolisten kasvien tunnistus onnistui käyttämällä multispektriaineiston luokittelua.
Chung et al. 2015	Veden lämpötilan mittaus järven eri syvyyksissä	AscTec FireFly -heksakopteri varustettuna painetta ja lämpötilaa mittaavalla sensorilla	Veden lämpötilan mittaus onnistuu laskemalla kopterista roikkuva anturi veteen. Veden lämpötilan mittausta eri syvyyksissä rajoittaa kopterin liikkuvuus, käytetyn vajerin pituus ja järven syvyys.



<b>Tekijät</b>	<b>Tutkimuskohde</b>	<b>Käytetyt RPAS-laitteet</b>	<b>Tutkimuksen tulokset</b>
Cimoli et al. 2017	Lumipeitteen paksuuden mittaaminen droonia ja fotogrammetrisia menetelmiä käyttämällä	Walkera X350 Pro -nelikopteri varustettuna GoPro Hero 3 -kameralla	SfM-tekniikalla tuotetun lumipeitteen paksuutta kuvaavan digitaalisen korkeusmallin keskimääräinen virhe vaihteli välillä 1,5–16,0 cm, kun tuloksia verrattiin maastomittauksiin. Menetelmä vaatii lisätutkimuksia muun muassa lentokorkeuden vaikutuksesta korkeusmallien tarkkuuteen.
Guimarães et al. 2017	Veden klorofyllipitoisuuden arviointi droonilla hankitusta aineistosta muodostetun kasvillisuusindeksin (NDVImod) avulla	Kiintosiipinen SenseFly Swinglet CAM -drooni varustettuna lähi-infrapuna- ja vihreää ja sinistä valoa kuvaavalla modifioidulla Canon ELPH 110HS -kameralla	Kasvillisuusindeksin (NDVImod) ja veden klorofyllipitoisuuden korrelaatio todistettiin. Menetelmän hyödyntäminen muissa vesistöissä vaatii lisätutkimuksia.
Harder et al. 2016	Droonin tuottaman kuvamateriaalin avulla tuotettujen digitaalisten pintamallien tarkkuuden arviointi lumipeitteen paksuuden määrittämisessä	Kiintosiipinen SenseFly eBee Real Time Kinematic (RTK) -drooni varustettuna Canon PowerShot ELPH 110 HS -kameralla	SfM-tekniikan käyttö lumipeitteen mallinnuksessa on haastavaa kuvan lumen vähäisen kontrastin ja korkean reflektanssin takia. Kolmella tutkimusalueella mallinnetun lumipeitteen paksuuden virhe oli 8,8 cm, 13,7 cm ja 8,5 cm.
Hemmelder et al. 2018	Jokiuoman eroosion seuranta vertailemalla droonilla otetuista valokuvista tuotettuja ortomosaiikkeja ja digitaalisia korkeusmalleja	Kiintosiipinen drooni varustettuna Canon PowerShot D10 RGB -kameralla	Kahtena eri ajankohtana (2014 ja 2015) otetuista ilmapalokuvista tuotetuista ortomosaiikeista ja digitaalisista maastomalleista pystyttiin havaitsemaan jokiuoman muodonmuutokset sekä arvioimaan erodoituneen aineksen tilavuus.
Husson et al. 2014	Järvi- ja jokiympäristön kasvilajien tunnistaminen droonilla otetuista ilmapalokuvista	PAMS-järjestelmä (Personal Aerial Mapping System), joka koostui kiintosiipisestä SmartOne-droonista varustettuna Canon Ixus 70 -digitaalikameralla, maassa olevasta tukiasemasta sekä SmartPlanes AerialMapper -ohjelmistosta	Droonilla otetuista valokuvista pystyttiin tunnistamaan kasvilajit järviympäristössä 95,1 prosentin tarkkuudella ja jokiympäristössä 80,4 prosentin tarkkuudella verrattuna maastossa tehtyyn kasvintunnistukseen.
Jenssen et al. 2020	UWB-tutkajärjestelmän käyttö lumipeitteen tutkimuksessa	Kraken K130 -oktokopteri varustettuna maanläpäisevällä UWB-tutkajärjestelmällä	Lumenkorkeuden mittaus onnistuu RPAS-laitteeseen asennettulla UWB-tutkajärjestelmällä ja sillä pystyttiin myös havaitsemaan prominentit kerrokset lumipeitteessä. Lumen tiheyden mittaus vaatii lisätutkimusta.

<b>Tekijät</b>	<b>Tutkimuskohde</b>	<b>Käytetyt RPAS-laitteet</b>	<b>Tutkimuksen tulokset</b>
Koparan et al. 2018	Vesinäytteenotto droonilla	Kustomoitu 2,3 kg painava heksakopteri varustettuna vesinäytteenottomella	Vesinäytteenotto RPAS-laitteella onnistui. Vesinäytteistä mitatut ominaisuudet kuten liuennut happi ja pH-arvo vaihtelivat, kun tuloksia verrattiin perinteisesti hankittuun vesinäytteen. Konsistenttien tulosten saamiseksi vaaditaan lisätutkimusta ja menetelmän kehitystä.
Luppichini et al. 2019	Digitaalisten korkeusmallien (DEM) tuottaminen tulvariskikartoitusta varten	DJI F550 -heksakopteri varustettuna Sony NEX-5T -kameralla.	Olemassa olevaa topografia-aineistoa pystyttiin päivittämään droonilla ja SfM-tekniikalla tuotetulla korkean resoluution aineistolla, mikä mahdollisti tarkemmat tulvamallinukset.
Michez et al. 2016	Jokirantojen vieraslajikasvien kartoitus droonilla otetuista ilmavalokuvista	Kiintosiipinen Gatewing X100 UAS -drooni varustettuna kahdella 10 megapikselin Ricoh GR3 -digitaalikameralla, joista toinen kuvansi NIR-säteilyä.	Kuvauslennon ajankohdan takia kaikkia tutkimuksen kohteena olleita vieraslajeja ei pystytty tunnistamaan tarkasti. Kasvien fenologinen vaihe (kukinta) vaikuttaa merkittävästi kasvilajin onnistuneeseen tunnistamiseen.
Niedzielski et al. 2019	Lumen vesi-arvon mallinnus hyödyntämällä arviota lumen tiheydestä sekä drooneilla kerättyjä havaintoja lumipeitteestä joen valuma-alueella	Kiintosiipinen SenseFly eBee-drooni varustettuna Canon PowerShot S110 -kameralla	Droonilla hankittujen valokuvien avulla tuotettuja korkeus- ja pintamalleja voidaan hyödyntää lumen sulamisesta aiheutuvan pintavalun mallinnuksessa. Lumen paksuus voidaan arvioida droonilla hankitun aineiston avulla, mutta lumen tiheys valuma-alueella arvioitiin vain muutaman pistemäisen mittauksen avulla.
Omar & Nehdi 2017	Sillan kuvaaminen drooniin asennetulla lämpökameralla	DJI Inspire 1 Pro -nelikopteri varustettuna FLIR Vue Pro -lämpökameralla (750–1350 nm)	Korkean resoluution lämpökameralla varustettu drooni on tehokas työkalu sillan kansirakenteen vaurioiden havaitsemiseen ja paikallistamiseen.
Ridolfi & Manciola 2018	Vedenkorkeuden määrittäminen drooniin asennetun kameran avulla	HIGHONE 4HSEPRO -nelikopteri varustettuna Sony Alpha 7R -kameralla	Cannyn reunantunnistusmenetelmää käytettiin droonilla kerätyn kuvamateriaalin analysoinnissa ja vedenpinnan korkeus saatiin selvitettyä.

<b>Tekijät</b>	<b>Tutkimuskohde</b>	<b>Käytetyt RPAS-laitteet</b>	<b>Tutkimuksen tulokset</b>
Salach et al. 2018	RPAS-laserkeilauksella sekä RPAS-fotogrammetrialla tuotettujen tiheiden pistepilvien vertikaalisen tarkkuuden arviointi	Hawk Moth -nelikopteri varustettuna YellowScan Surveyor -laserkeilaimella sekä Sony Alpha a6000 -RGB-kameralla	Kartoitetun maaston kasvillisuus heikensi fotogrammetrisin menetelmin tuotettuja pistepilvien ja digitaalisten korkeusmallien tarkkuutta.
Suomen ympäristökeskus 2019b	Vuosina 2017-2018 toteutetussa DROMINÄ-hankkeessa tutkittiin vesinäytteenottoa sekä vedenlaadun mittausantureiden käyttöä drooneilla	DJI Matrice S600 Pro -heksakopteri varustettuna näytteenottimella ja DJI Phantom 4 Pro -nelikopteri varustettuna vedenlaadun mittausanturilla	Vesinäytteenotto heksakopteriin asennetulla Limnos-noutimella onnistui ja myös vedenlaadun mittausantureita käytettiin nelikopterilla onnistuneesti.
Tauro et al. 2016	Veden virtausnopeuden selvittäminen droonilla hankitun videokuvan analysointimenetelmällä (LSPIV)	DJI Phantom 2 -nelikopteri, johon on integroitu GoPro Hero 3 -kamera	LSPIV-menetelmän käyttöä luonnonvesissä rajoittaa merkkiaineen puuttuminen sekä droonin epävakaas ja värinä.
Viljanen et al. 2018	Nurmisäilörehun biomassan arviointi käyttämällä koneoppimista, RGB-kuvia, fotogrammetria menetelmiä sekä hyperspektriaineistoa	Gryphon Dynamics -runkoinen kustomoitu nelikopteri sekä Sony A7R -RGB-kamera ja FPI-hyperspektrisensori (500–900 nm)	RPAS-laitteella hankitun aineiston analyysissä käytettiin usean riippumattoman muuttujan lineaariseen regressioon sekä satunnaisten metsän algoritmiin perustuvaa koneoppimista onnistuneesti. Parhaat tulokset saatiin käyttämällä korkeusmalleja, RGB-kuvia ja hyperspektriaineistoa nurmikon tunnistamisessa, luokittelussa ja biomassan määrän arvioinnissa.
Wu et al. 2019	Maan kosteuden kartoitus drooniin asennetulla maatutkalla	RCTakeOff X8 -nelikopteri varustettuna kahdeksalla roottorilla ja Planar R60 -vektoripii-rianalysaattoria hyödyntävällä maatutkajärjestelmällä	Alavien peltoalueiden ympäristöönsä nähden suuri maankosteus kartoitettiin onnistuneesti käytetyllä tutkajärjestelmällä. Droonin epävakaas tuottaa kuitenkin ongelmia tutkan käytölle.